

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.А. Попов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**спеціалізації** Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

**на тему:** «Комбінований метод оцінки спотворень якості електричної енергії з використанням ортогональних перетворень»

Виконав: студент VI курсу, групи ОН-81мп

\_\_\_\_\_ Проходчук Вадим Васильович \_\_\_\_\_  
( прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Волошко А.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

## РЕФЕРАТ

**Структура та обсяг роботи:** дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 25 найменувань, з них 13 іноземних. Загальний обсяг роботи складає 99 сторінок, містить 21 рисунки та 14 таблиць. Для виконання роботи використовувалось програмне забезпечення: MS Office.

**Тема магістерської дисертації:** «Комбінований метод оцінки спотворень якості електричної енергії з використанням ортогональних перетворень».

**Мета магістерської дисертації** – на основі огляду та порівняльного аналізу існуючих способів оцінювання якості електричної енергії вдосконалити існуючий спосіб або розробити новий.

**Актуальність теми.** Дослідження сучасного стану якості енергетичних послуг та процесу транспортування енергетичних ресурсів до споживачів підприємств, організацій, установ можна відзначити, що перехід на сучасне електроспоживання з застосуванням різноманітних технологій є доцільним та якісним не тільки з точки зору споживання електричних послуг на ринку електроенергії, але й з точки зору транспортування електричної енергії. Спосіб передачі електричних ресурсів споживачеві в сучасних умовах вигідний тим, що не потрібно вимикати та вмикати електричну мережу при перевантаженнях; сучасні пристрої це роблять автоматично за допомогою спеціальних вимикачів та перетворювачів. Контроль потужності є керованим та не потребує постійних додаткових налаштувань в реальному часі. Розташування сучасних станцій близько до живлення об'єкту є зручним

не тільки з точки зору надійного та безперебійного постачання, а й з точки зору надання сервісних послуг при можливих пошкодженнях пристроїв чи обладнання станції чи споживача.

Сучасні технології дають змогу чітко окреслити обсяг енергоспоживання об'єктом зменшуючи ризик втрат не тільки у постачальника, але й в споживача. Забезпечивши надійне та безперебійне постачання енергетичних послуг енергокомпанія зменшить витрати на закупівлю енергоресурсів, а тим самим заощадить кошти на придбання додаткового енергоефективного обладнання.

Для того, щоб користування послугами було надійним та безперебійним НКРЕКП встановив певні вимоги, за якими функціонування системи енергопостачання буде ефективним та енергоощадним з точки зору збереження енергії для майбутнього користування спеціальними приладами та технологіями.

Вимоги такі:

- 1) безперебійність постачання електричної енергії організаціями за групами електроспоживання;
- 2) комерційна якість послуг (якість відносин між компанією та споживачем);

Встановлення необхідних сучасних пристроїв контролю за електроенергією дає змогу споживачеві власне керувати процесом енергоспоживання та дивитися скільки спожито енергії за відповідний період та ціну за спожиту електроенергію.

Встановлення необхідних сучасних пристроїв контролю за електроенергією дає змогу споживачеві власне керувати процесом

енергоспоживання та дивитися скільки спожито енергії за відповідний період та ціну за спожиту електроенергію.

Слід зазначити, що відповідні пристрої, які контролюють надійність та безперебійність постачання завдяки регулюванню, а саме векторному регулюванню електроенергії завдяки сучасним технологіям передачі змінного струму, а саме технологіям FACTS, які забезпечують в системі регулювання, як реактивною потужністю так і активною потужністю (за рахунок фазового кута напруги). За рахунок гнкої системи керування ця система має низку переваг над традиційними системами розподілу електричної енергії, а саме:

- 1) Можливість керування потужністю та пропускнуою здатністю ліній передачі;
- 2) Керування потужністю під час аварійних режимів або аварійних ситуаціях, які виникають безпосередньо у споживача енергії;
- 3) Без обмежень керувати величинами напруги, потужності (фазового кута напруги) та частотою в системі електропостачання.

Головною та найважливішою проблемою, яка постає перед енергопостачальною організацією, це надійне та безперебійне постачання електричної енергії клієнтам (споживачам), тобто постачання з додержанням усіх вимог, як державних так і міждержавних вимог, щодо належного постачання електроенергії установам, організаціям, адміністративним будинкам та іншим споживачам.

До якості електричної енергії були встановлені відповідні вимоги, додержуючись яких можна чітко визначити сучасний стан забезпечення електроенергією споживачів.

**Задачі дослідження:**

1. Проаналізувати сучасний стан способів оцінювання якості електричної енергії;
2. Визначити характерні ознаки вимірювального сигналу для ідентифікації спотворення якості електричної енергії;
3. Розробити модель інформаційного сигналу та спосіб визначення наявності спотворення якості електричної енергії.

**Ключові слова:** якість електричної енергії, ортогональні перетворення, вейвлет-перетворення, вейвлет-функція, ідентифікатор спотворень

**ABSTRACT**

**Structure and scope of work:** the dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used, which contains 25 titles, 13 of them foreign. The total amount of work is 99 pages, contains 21 figures and 14 tables. For performance of work the software was used: MS Office.

**The theme of the master's thesis:** "A combined method for assessing the distortion of the quality of electrical energy using orthogonal transformations."

**The purpose of the master's thesis** – based on the review and comparative analysis of existing methods of assessing the quality of electric energy to improve the existing method or develop a new one.

**Actuality of theme.** The study of the current state of the quality of energy services and the process of transportation of energy resources to consumers of enterprises, organizations, institutions it can be noted that the transition to modern electricity using a variety of technologies is appropriate and qualitative not only in terms of consumption of electrical services in the electricity market, but also in terms of The method of transmission of electrical resources to the consumer in modern conditions is advantageous in that it is not necessary to turn off and turn on the electrical network during overloads; modern devices do this automatically with the help of special switches and converters. Power control is controllable and does not require constant additional settings in real time. The location of modern stations close to the power supply facility is convenient not only in terms of reliable and uninterrupted supply, but also in terms of providing services in case of possible damage to the devices or equipment of the station or the consumer.

Modern technologies make it possible to clearly outline the amount of energy consumption, reducing the risk of losses not only for the supplier, but also for the consumer. Providing reliable and uninterrupted supply of energy services, the

energy company will reduce the cost of purchasing energy resources, and thus save money on the purchase of additional energy-efficient equipment.

In order for the use of services to be reliable and uninterrupted, the NEURC has established certain requirements according to which the operation of the power supply system will be efficient and energy-saving in terms of energy conservation for users to use special devices and technologies.

The requirements are:

1) continuity of supply of electric energy by the organizations on groups of power consumption;

2) commercial quality of services (quality of relations between the company and the consumer);

Installation of necessary modern devices of control for the electric power allows the consumer actually to operate process of power consumption and to look how many energy is consumed for the corresponding period and the price for the consumed electric power.

Installation of necessary modern devices of control for the electric power allows the consumer actually to operate process of power consumption and to look how many energy is consumed for the corresponding period and the price for the consumed electric power.

It should be noted that the relevant devices that control the reliability and continuity of supply through regulation, namely vector regulation of electricity through modern AC transmission technologies, namely FACTS technologies that provide in the control system, both reactive power and active power (due to the phase angle of the voltage). Due to the flexible control system, this system has a number of advantages over traditional electrical energy distribution systems, namely:

1) The ability to control the power and capacity of transmission lines;

2) power management during emergency modes or emergency situations arising directly from the energy consumer;

3) control voltage, power (phase angle of voltage) and frequency in the power supply system without restrictions.

The main and the most important problem which arises before the power supplying organization is reliable and uninterrupted supply of electric energy to clients (consumers), that is delivery with observance of all requirements, both state and interstate requirements, on proper supply of the electric power to establishments, the organizations, administrative suppliers and other consumers.

To quality of electric energy the corresponding requirements following which it is possible to define accurately a modern condition of providing with the electric power of consumers have been established.

**Research problem:**

1. To analyze the current state of methods for assessing the quality of electric energy;
2. Determine the characteristic features of the measuring signal to identify the distortion of the quality of electrical energy;
3. To develop a model of the information signal and a method for determining the presence of distortion of the quality of electrical energy.

**Key words:** quality of electric energy, orthogonal transformations, wavelet transformations, wavelet function, distortion identifier.



ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇЇ ОЦІНЮВАННЯ.....	14
1.1 Огляд сучасних методів оцінювання якості електричної енергії.....	14
1.2 Дослідження споживання електричної енергії на основі відхилення напруги напрутязі певного інтервалу часу.....	27
1.3 Основні характеристики параметрів якості електричної енергії та їх вплив на ефективність роботи електроприймачів.....	29
Висновки за розділом 1.....	50
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО СИГНАЛУ ТА СПОСОБУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	52
2.1 Формування моделі вимірювального сигналу на основі ортогональних перетворень (вейвлет-аналізу).....	52
2.2 Розроблення ідентифікатора наявності спотворення якості електричної енергії.....	57
Висновки за розділом 2.....	61
РОЗДІЛ 3 АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	62
3.1 Порівняльний аналіз результатів обробки вимірювального сигналу за допомогою розробленого способу та Фур'є перетворення.....	62
Висновки за розділом 3.....	71
РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	74
4.1 Опис ідеї проекту.....	74

4.2 Застосування гнучкої системи передачі змінного струму для можливості ругелювання напругою та активною потужністю (фазового кута напруги) з метою корегування спотворень якості електричної енергії в сучасних електроенергетичних системах.....	75
4.3 Технологічний аудит проекту.....	85
4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	88
4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	91
4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	93
Висновки за розділом 4.....	94
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

НКРЕКП – національна комісія регулювання енергетики та комунальних послуг;

ЯЕЕ – якість електричної енергії;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ЗВ – засіб вимірювання;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є;

ПБЗ – перемикання без збудження;

РПН – регулювання під навантаженням

## **ВСТУП**

Досліджуючи стан сучасної якості енергетичних послуг та процесу транспортування енергетичних ресурсів до споживачів підприємств, організацій, установ можна відзначити, що перехід на сучасне електроспоживання з застосуванням різноманітних технологій є доцільним та якісним не тільки з точки зору споживання електричних послуг на ринку електроенергії, але й з точки зору транспортування електричної енергії. Спосіб передачі електричних ресурсів споживачеві в сучасних умовах вигідний тим, що не потрібно вимикати та вмикати електричну мережу при перевантаженнях; сучасні пристрої це роблять автоматично за допомогою спеціальних вимикачів та перетворювачів. Контроль потужності є керованим та не потребує постійних додаткових налаштувань в реальному часі. Розташування сучасних станцій близько до живлення об'єкту є зручним не тільки з точки зору надійного та безперебійного постачання, а й з точки зору надання сервісних послуг при можливих пошкодженнях пристроїв чи обладнання станції чи споживача.

Сучасні технології дають змогу чітко окреслити обсяг енергоспоживання об'єктом зменшуючи ризик втрат не тільки у постачальника, але й в споживача. Забезпечивши надійне та безперебійне постачання енергетичних послуг енергокомпанія зменшить витрати на закупівлю енергоресурсів, а тим самим заощадить кошти на придбання додаткового енергоефективного обладнання.

Для того, щоб користування послугами було НКРЕКП встановив певні вимоги, за якими функціонування системи енергопостачання буде ефективним та енергоощадним з точки зору збереження енергії для майбутнього користування спеціальними приладами та технологіями.

Вимоги такі:

1) безперебійність постачання електричної енергії організаціями за групами електроспоживання;

2) комерційна якість послуг (якість відносин між компанією та споживачем);

Встановлення необхідних сучасних пристроїв контролю за електроенергією дає змогу споживачеві власне керувати процесом енергоспоживання та дивитися скільки спожито енергії за відповідний період та ціну за спожиту електроенергію.

Слід зазначити, що відповідні пристрої, які контролюють надійність та безперебійність постачання завдяки регулювання, а саме векторному регулювання електроенергії завдяки сучасним технологіям передачі змінного струму, а саме технології FACTS, яке забезпечує в системі регулювання, як реактивною потужністю так і активною потужністю (за рахунок фазового кута напруги). За рахунок гнучкої системі керування ця система має низку переваг над традиційними системами розподілу електричної енергії, а саме:

1) Можливість керування потужністю та пропускну здатністю ліній передачі;

2) Керування потужністю під час аварійних режимів або аварійних ситуаціях, які виникають безпосередньо у споживача енергії;

3) Без обмежень керувати величинами напруги, потужності (фазового кута напруги) та частотою в системі електропостачання.

## РОЗДІЛ 1

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇЇ ОЦІНЮВАННЯ

### 1.1 Огляд сучасних методів оцінювання якості електричної енергії

Під терміном «якість електричної енергії» (ЯЕЕ) розуміється відповідність основних показників встановленим нормам при виробництві, передачі і розподілі електричної енергії загального призначення [1]. Ці основні показники визначають сукупність споживчих властивостей електричної енергії, її придатність задовольняти певні потреби електроприймачів відповідно до їх призначення.

Системи електропостачання і приймачі електричної енергії проектують і виконують такими, щоб якнайкраще їх функціонування досягалося при живленні їх від однофазної або симетричної трифазної системи напруги заданої амплітуди і синусоїдальної форми з частотою 50 Гц. Проте в реальних мережах виникають відхилення від ідеальних параметрів.

На електростанціях виробляють електроенергію досить високої якості, а погіршення її якості відбувається в процесі передачі і споживання, в результаті впливу електричних приймачів. Таким чином, необхідно розрізняти якість електроенергії енергозабезпечуючої організації і якість споживаної електроенергії.

Причинами, що знижують якість електричної енергії є:

- 1) зміна структури енергоносіїв;
- 2) збільшення числа могутніх приймачів електричної енергії;
- 3) дія нелінійних навантажень;

4) посилення взаємного впливу різних видів електрообладнання (Для характеристики цього впливу використовується поняття «електромагнітна сумісність» (ЕМС). Під ЕМС розуміється «здатність пристрою або системи задовільно функціонувати в його електромагнітному оточенні». ЕМС визначає міру взаємного впливу електрообладнання, при якій відсутні

порушення нормальної роботи і зниження ефективності роботи нижче певної економічно обґрунтованої межі [2].)

Якість електричної енергії ЯЕЕ—ступінь відповідності характеристик електричної енергії в даній точці електричної системи сукупності нормованих показників ЯЕ.

Класи характеристик процесу вимірювань.

Стандарт встановлює для кожного вимірювального показника ЯЕЕ три класи характеристик процесу вимірювання А, S і В (далі - класи А, S, В). Для кожного класу визначені методи вимірювань і відповідні вимоги до характеристик ЗВ.

#### Клас А

Даний клас застосовують, якщо необхідно проведення точних вимірювань, наприклад, при перевірці відповідності стандартам, що встановлює норми ЯЕЕ, при виконанні умов договорів, передбачуваних можливість вирішення спірних питань шляхом вимірювань і т. д. Будь-які вимірювання показника ЯЕЕ, проведені двома різними ЗВ, відповідними вимогам класу А, повинні при вимірі одних і тих же сигналів забезпечувати отримання відтворюваних результатів з встановленою для даного показника невизначеністю.

#### Клас S

Даний клас застосовують при проведенні обстежень та оцінки ЯЕЕ з використанням статистичних методів, в тому числі при обмеженій номенклатурі показників. Хоча інтервали часу вимірювань показників ЯЕЕ для класів S і А однакові, вимоги до характеристик процесу вимірювання класу S знижені.

#### Клас В

Даний клас встановлений для того, щоб уникнути визнання ЗВ багатьох існуючих типів застарілими.

Показники якості електричної енергії. Частота. Методи оцінювання або методи вимірювання.

#### Клас А

Значення частоти має бути виміряне на кожному інтервалі часу 10 с. Оскільки частота змінного струму може не дорівнювати точно 50 або 60 Гц в межах інтервалу 10 с, число періодів може бути не цілим числом. Виміряна основна частота дорівнює відношенню числа цілих періодів, підрахованих в 10-секундний інтервал часу, до загальної тривалості цілих періодів. Перед кожною оцінкою частоти гармоніки і інтергармонік повинні бути ослаблені з тим, щоб мінімізувати вплив багаторазових перетинів нуля.

Інтервали часу вимірювань 10 с не повинні перекриватися. Окремі періоди, які перекривають 10-секундний інтервал поточного часу, не враховують. Кожен 10-секундний інтервал повинен починатися на абсолютній 10-секундній позначці поточного часу. Невизначеність при установці поточного часу не повинна перевищувати  $\pm 20$  мс при вимірах в системах частотою 50 Гц і  $\pm 16,7$  мс - в системах частотою 60 Гц.

Допускається застосування інших методів для отримання еквівалентних результатів.

#### Клас S

Застосовують метод вимірювань, встановлений для класу А.

#### Клас В

Метод вимірювань частоти встановлює виробник ЗВ.

Невизначеність вимірювань і діапазон вимірювань.

#### Клас А

Невизначеність вимірювань в області значень впливаючих величин і при виконанні вимог, встановлених в пункті 6.1 [2] не повинна перевищувати  $\pm 0,01$  Гц при діапазонах вимірювань 42,5 - 57,5 / 51- 69Гц.

#### Клас S

Невизначеність вимірювань в області значень впливаючих величин і при виконанні вимог, встановлених в 6.1 [2], не повинна перевищувати  $\pm 0,05$  Гц при діапазонах вимірювань 42,5 - 57,5 / 51- 69Гц.

#### Клас В



Невизначеність вимірювань при діапазонах вимірювань 42,5 - 57,5 / 51-69 Гц встановлює виробник ЗВ. Виробник ЗВ встановлює метод розрахунку невизначеності вимірювань.

Оцінка результатів вимірювань.

Клас А

При вимірюванні частоти використовують опорний канал.

Виробник ЗВ повинен встановити характеристики процесу вимірювання частоти при втраті сигналу в опорному каналі.

Клас S

Також, як для класу А.

Клас В

Виробник ЗВ повинен вказати процес, який використовується для вимірювань частоти.

Об'єднання результатів вимірювань.

Об'єднання результатів вимірів не застосовують.

Як показник ЯЕ допускається застосування відхилення частоти від номінального значення.

Для кожного показника якості електричної енергії встановлено метод вимірювання або метод оцінювання.

Розглянемо деякі показники якості електричної енергії :

- 1) Визначення значення відхилення прямої послідовності;
- 2) Визначення розмаху зміни напруги;
- 3) Визначення частоти зміни напруги;
- 4) Коефіцієнт несиметрії напруги

Розглянемо формули за якими можна знайти відповідні значення та розглянемо рисунок 1.1.

- 1) Визначення значення відхилення прямої послідовності:

$$\delta U_y = \frac{U' - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.1)$$

$U'$  – напруга прямої послідовності

2) Визначення розмаху зміни напруги:

$$\delta U_t = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.2)$$

3) Визначення частоти зміни напруги:

$$\Delta f = \frac{m}{t}, \quad (1.3)$$

де  $m$  – кількість зміни напруги з швидкістю змін більше 1% в 1 с за час  $t$

1) Коефіцієнт несиметрії напруги ( $k_{\text{нс}}$  не повинен перебільшувати 5 %):

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{g=2}^n U_g^2}}{U_1'} \cdot 100 [\%] \approx \frac{\sqrt{\sum_{g=2}^n U_g^2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 [\%], \quad (1.4)$$

де  $U_g^2$  – діюче значення напруги  $g$ -й гармоніки;

$U_1'$  – напруга прямої послідовності основної частоти;

$n$  – номер останньої із врахованих гармонік.

Розглянемо рисунок 1.1, на якому показано спотворення споживання електричної енергії за певний проміжок часу.

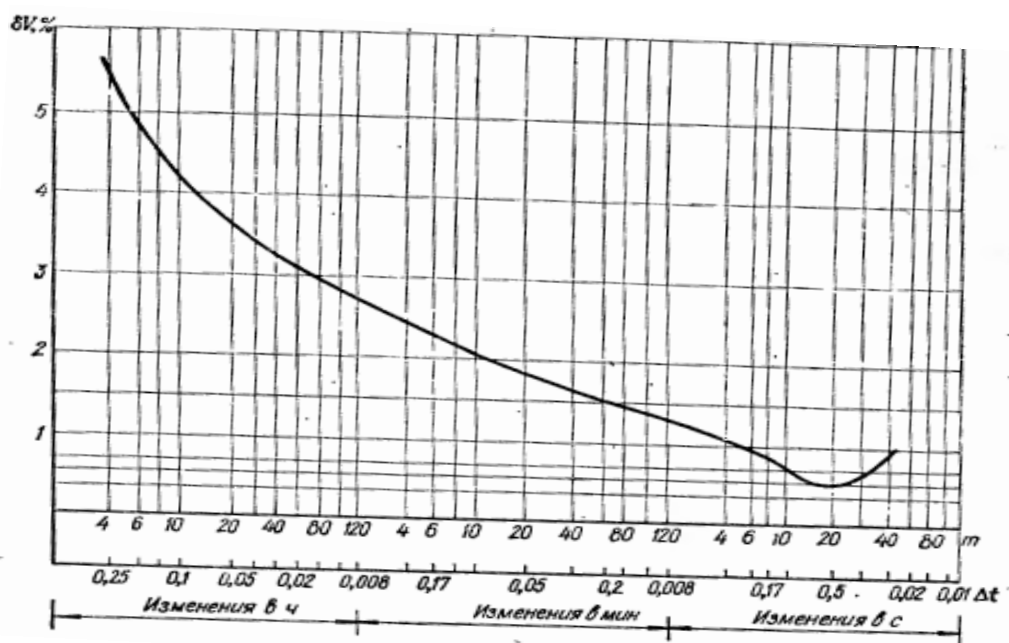


Рисунок 1.1 – Відхилення напруги за певний інтервал часу

Згідно з [1] про якість електричної енергії вставлені допустимі межі основних показників, які можуть вплинути на електропостачання (Таблиця 1.1):

Таблиця 1.1. – Допустимі межі відхилення показників

Найменування показника	Допустиме значення показника	
	нормальне	граничне
1) Відхилення напруги	(+5;-5)	(+10;-10)
2) Доза флікера, відн. од.:		
- короткочасна тривала		1,38
- тривала		1,00
3) Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %, не більше	8	12

Продовження таблиці 1.1

4) Коефіцієнт гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку, %, не більше	5 (2)	7,5 (3)
5) Несиметрія напруги, %	2	4
6) Тривалість провалу напруги, с.		30
7) Відхилення частоти, Гц.	(+0,2; -0,2)	(+0,4; -0,4)

Проаналізуємо сучасний стан методів оцінювання спотворень якості електричної енергії

Дві основні групи спотворень якості електричної енергії, до яких відносяться: стаціонарні (або квазістаціонарні) і спотворення, що змінюються у часі. Перша група включає: гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг. Друга група включає: перехідні процеси напруги (voltage transient), зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші високочастотні спотворення [1].

Існує багато методів обробки інформаційних сигналів, які використовуються для визначення показників якості електричної енергії. Один з найвідоміших є метод середньоквадратичних значень на основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією [3].

Середньоквадратичне значення періодичної напруги  $V_{rms}$  знаходиться за наступною формулою:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt},$$

де  $T$  – період зміни напруги  $v(t)$ .

Для синусоїдальної напруги його амплітудне значення  $V_{pk}$  пов'язане середньоквадратичним співвідношенням  $V_{rms} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}}$ . Для послідовних прямокутних імпульсів (Рис. 1.2), яка не містить постійної складової, середньоквадратична напруга збігається з амплітудним.

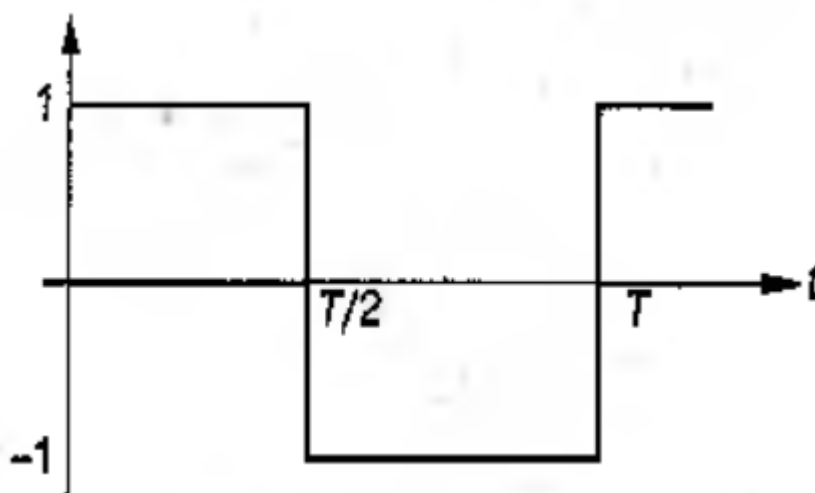


Рис. 1.2 – Послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою  $\pm 1$  та періодом  $T$

Цей метод використовується тільки для визначення середньоквадратичного значення напруги електричної мережі та для автоматичної класифікації сигналів.

Також застосовуються для визначення показників якості електричної енергії фільтри Калмана. Фільтр Калмана спрощує вимоги моделювання для частоти та оцінки амплітуди сигналу [4]. Перевагами даного методу являється стійкість та використання  $\alpha\beta$ -трансформації для аналізу енергосистеми.

Для аналізу параметрів якості електричної енергії застосовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Основою функцією даного методу є те,

що за можливо трансформувати сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонент [5]. Алгоритм Фур'є має методичні похибки. Недоліком даного методу є обмеженість частотної роздільності та неповна точність оцінки частоти певної гармонічної складової.

Застосування допоміжних математичних операцій дає змогу підвищити точність проведення перетворення Фур'є. Вплив нестабільності частоти мережі на точність проведення гармонічного аналізу та визначення показників якості електричної енергії (ЯЕЕ) [6]. Один із методів обробки сигналів є спектральний аналіз, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Перетворення Фур'є – математична основа, яка пов'язує часовий або просторовий сигнал (чи деяку модель цього сигналу) з його поданням до частотної області [7], або застосування швидких алгоритмів для ефективного обчислення цього перетворення [8]. Також використовуються інтерполяційні алгоритми для зменшення спектральних витоків [9,10].

Ми розглянули засоби ідентифікації спотворення, які використовуються для однотипових спотворень. Для електроенергетичних систем слід розглядати наявність в одному інтервалі часу декількох видів спотворень. Ідентифікація двох типів спотворень досліджував Abdel-Galil (2004 р.), дискретна вейвлет-трансформація, який потім розробив алгоритм (decision tree) [11]. Також в своїх роботах досліджував вейвлет-трансформацію Naibo He (2006 р.) [12]. Потім у 2007 р. Riberio запропонував принцип поділу електричного сигналу на ряд простих компонент для того, щоб класифікувати спотворення у електричній мережі [13]. Також у 2007 р. Lie для ідентифікації складних спотворень запропонував одну із версій машини опорних векторів (SVM).

Аналіз відповідних літературних джерел дозволив оглянути наступні методи ідентифікації типу спотворень якості електричної енергії:

- 1) Штучні нейронні мережі (скриті марківські моделі). Zwe-Lee Ching (2004-2012 р.) [14];
- 2) На основі експертних систем. Santoso (2000 р.). Адаптивної нечіткої експертної системи. Ibrahim (2001 р.) [15];
- 3) Експертні системи із нечіткою логікою. Bizjak (2006-2010 р.) [16];
- 4) SVM – методологія навчання за прецедентами (Bishop, Moulin, Lin, Axelberg, Roberts) [17];
- 5) Комбіновані методи – штучні нейронні мережі та SVM [18];
- 6) Вейвлети та моделі Маркова [19], експертні системи із нечіткою логікою та Фур’є-аналіз [20].

Розглянемо показники якості надання послуг з електропостачання.

Надійність (безперервність) електропостачання споживача характеризується такими показниками:

1) індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIDI) розраховується як відношення сумарної тривалості довгих перерв в електропостачанні в точках комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання за звітний період, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n}, \text{ хв} \quad (1.5)$$

де  $t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, хв;

$n_i$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання у результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;

$k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;

$i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots k$ ;

$n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.;

2) індекс середньої частоти довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIFI) розраховується як відношення сумарної кількості відключених точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок усіх довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}, \text{ хв} \quad (1.6)$$

$n_i$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання у результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;

$k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;

$i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots k$ ;

$n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.;

3) індекс середньої частоти коротких перерв в електропостачанні в системі (MAIFI) розраховується як відношення сумарної кількості



відключених точок комерційного обліку електричної енергії протягом звітнього періоду до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою

$$MAIFI = \frac{\sum_{j=1}^r n_j}{n}, \text{ хв} \quad (1.7)$$

$n_j$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання у результаті  $j$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;

$r$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітнього періоду;

$j$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $j = 1, 2, 3, \dots, r$ ;

$n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.;

4) розрахунковий обсяг недовідпущеної електроенергії (ENS) розраховується як сума добутків кількості точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання, на тривалість довгої перерви та на середнє споживання електроенергії на відповідному рівні напруги за формулою

$$ENS = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot t_i \cdot Q}{T} \cdot Z_1, \text{ тис.кВт} \cdot \text{год} \quad (1.8)$$

$Z_1$  – ознака рівня напруги та відповідної території ( $Z_1$  – 0,4 кВ – міський населений пункт,  $Z_2$  – 0,4 кВ – сільський населений пункт,  $Z_3$  – 6-20 кВ – міський населений пункт,  $Z_4$  – 6-20 кВ – сільський населений пункт,  $Z_5$  – 27,5-35 кВ,  $Z_6$  – 110/154 кВ);

$i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;

$n_i^{Z1}$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок  $i$ -ї довгої перерви, з  $Z1$ -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, шт.;

$t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, хв;

$Q^{Z1}$  – середньомісячне споживання електричної енергії в попередньому році на одну точку комерційного обліку електричної енергії з  $Z1$ -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, тис. кВт·год;

$T$  – звітний період часу (середньомісячний за рік), перерахований у хвилинах,  $T = 43800$ .

Показники якості електропостачання, які характеризують комерційну якість надання послуг з розподілу електричної енергії:

Комерційна якість надання послуг характеризує якість взаємовідносин оператора системи розподілу зі споживачем, зокрема дотримання встановлених Кодексом системи розподілу та іншими нормативно-правовими актами строків надання послуг та виконання робіт щодо:

- 1) приєднання до системи розподілу;
- 2) надання послуг з розподілу електричної енергії;
- 3) відновлення електропостачання та забезпечення належної якості електричної енергії;
- 4) питань комерційного обліку;
- 5) відповідей на звернення та скарги споживачів тощо.

**1.2 Дослідження споживання електричної енергії на основі відхилення напруги напрутязі певного інтервалу часу**

Всі споживачі електричної енергії найефективніше працюють при номінальній напрузі. Про те кожний провідник має певний опір і при проходженні по ньому електричного струму виникають втрати напруги і тому до споживачів подається напруга відмінна частково від номінальної.

Різниця між дійсною напругою, що подається до споживача і номінальною напругою називається відхиленням напруги.

Відхилення напруги вздовж магістралі буде різним (рис. 1.3). На початку лінії (точка а) напруга найбільша, а в кінці (точка с ) – найменша.

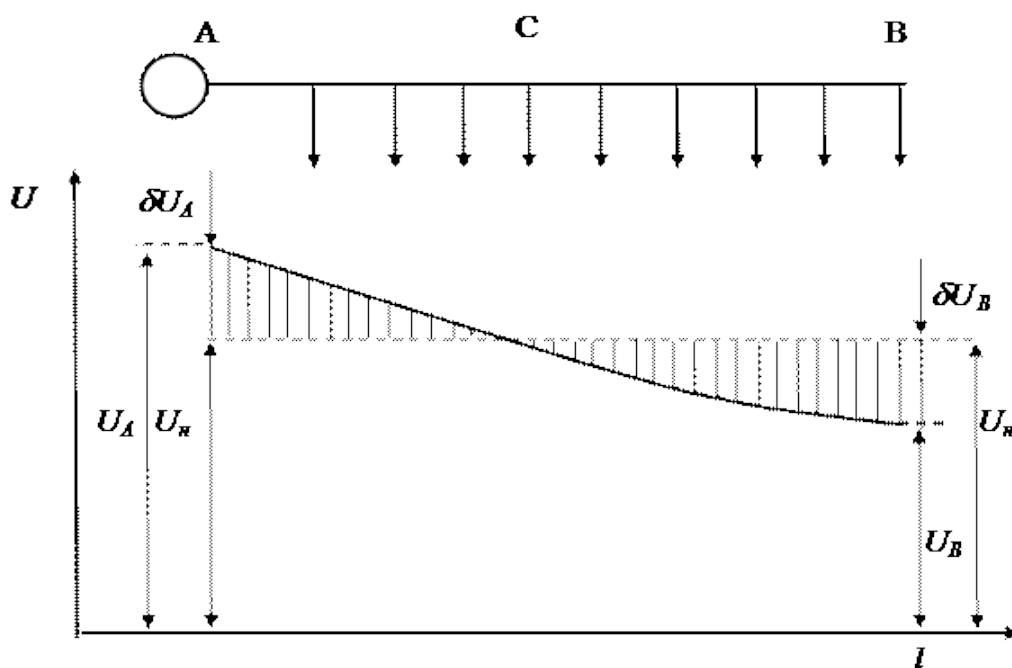


Рисунок 1.3 – Графік розподілу напруги вздовж лінії з рівномірним навантаженням

Відхилення напруги для точки а

$$Y_a = U_a - U_{\text{ном}} \quad (1.9)$$

для точки с

$$Y_c = U_c - U_{\text{ном}} \quad (1.10)$$

Номінальна напруга буде лише в точці 0.

Найчутливішими до зміни напруги живлення є лампи розжарювання.

Якщо напруга  $>$  на 10% строк служби  $<$  4 роки, при  $<$  на 10% світловий потік  $<$  на 35%.

Значне відхилення напруги в силових мережах може привести до браку у виробництві і прискореного спрацювання електродвигунів.

Тому при проектуванні електричних мереж використовують засоби регулювання:

- 1) зміною напруги на затискачах генератора;
- 2) зміною коефіцієнту тр-ції трансформаторів і автотрансформаторів;
- 3) застосування статичних конденсаторів і синхронних компенсаторів.

Найбільш поширеною є централізоване регулювання напруги на шинах підстанцій, якщо воно нас не задовольняє, то його доповнюють місцевим регулюванням напруги.

У відповідності з [1] допускаються такі відхилення напруги:

- а) тваринницькі комплекси і птахоферми  $\pm 5\%$ ;
- б) інші споживачі в сільській місцевості  $\pm 5\%$ .

При ремонтах протягом доби допускається додаткове зниження напруги на 5%.

Знайдемо втрату напруги в лінії віднявши рівняння (1.9) від (1.10):

$$Y_a - Y_c = U_a - U_c = \Delta U_{ac} \quad (1.11)$$

### 1.3 Основні характеристики показників якості електричної енергії та їх вплив на ефективність роботи електроприймачів

Згідно [1] під показником якості електричної енергії (ПЯЕ) розуміється «величина, що характеризує ЯЕ по одному або декільком її параметрам».

До основних показників якості електричної енергії, що визначають властивості електричної енергії, які характеризують її якість, відносяться:

- 1) відхилення напруги ( $\delta U_t$ , %);
- 2) розмах зміни напруги ( $\delta U_t$ , %);
- 3) доза коливань напруг ( $\psi$ , %);
- 4) коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги ( $K_{\text{нс}U}$ , %);
- 5) коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги непарного (парного) порядку ( $K_{U(n)}$ , %);
- 6) коефіцієнт зворотної послідовності напруг ( $K_{2u}$ , %);
- 7) коефіцієнт нульової послідовності напруг ( $K_{0u}$ , %);
- 8) тривалість провалу напруги ( $\Delta t_{\text{пр}}$ , с);
- 9) імпульсна напруга ( $U_{\text{імп}}$ , В, кВ);
- 10) відхилення частоти ( $\Delta f$ , Гц).

#### Відхилення напруги

Відхилення напруги – це один з найважливіших показників якості електроенергії. Відхилення напруги знаходиться за формулою:

$$\delta U_t = \frac{U_t - U_n}{U_n} \cdot 100\%, \quad (1.12)$$

де  $U_t$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, або просто діюче значення напруги (при коефіцієнті несинусоїдальності, меншому або рівному 5%), в момент часу  $t$ , кВ;

$U_n$  – номінальна напруга, кВ.

Величина  $U_t = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB1} + U_{BC1} + U_{AC1})$ , де  $U_{AB1}, U_{BC1}, U_{AC1}$  – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Через зміни навантажень в часі, зміни рівня напруги та інших факторів змінюється величина падіння напруги в елементах мережі і, отже, рівень напруги  $U_t$ . В результаті виявляється, що в різних точках мережі в один і той же момент часу, а в одній точці – в різні моменти, відхилення напруги різні.

Нормальна робота електроприймачів в мережах напругою до 1 кВ забезпечується за умови, що відхилення напруги на їх вході рівні  $\pm 5\%$  (нормальне значення) і  $\pm 10\%$  (максимальне значення). У мережах напругою 6 - 20 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги  $\pm 10\%$ .

Потужність, споживана лампами розжарювання, прямо пропорційна підведеній напрузі в степені 1,58, світлова віддача ламп – в степені 2,0, світловий потік – в степені 3,61, термін служби ламп – в степені – 13.57. Робота люмінесцентних ламп від відхилення напруги залежить менше. Так термін їх служби змінюється на 4% при відхиленні напруги на 1%.

Зниження освітленості робочих місць відбувається при зменшенні напруги, що призводить до зниження продуктивності праці працюючих і погіршення їх зору. При великих зниженнях напруги люмінесцентні лампи не загораються або блимають, що призводить до скорочення терміну їх служби. При підвищенні напруги термін служби ламп розжарювання різко знижується.

Від рівня напруги залежить швидкість обертання асинхронних електродвигунів і, отже, їх продуктивність, а також споживана реактивна потужність. Останнє відбивається на величині втрат напруги і потужності на ділянках мережі.

Зниження напруги призводить до збільшення тривалості технологічного процесу в електротермічних і електролізних установках, а також до неможливості стійкого прийому в комунальних мережах телевізійних передач. В останньому випадку застосовуються так звані стабілізатори напруги, які самі споживають значну реактивну потужність і у яких є втрати потужності в сталі. На їх виготовлення витрачається дефіцитна трансформаторна сталь.

Для забезпечення необхідного напруги на шинах низької напруги всіх ТП різняють так зване зустрічну регулювання напруги в центрі живлення. Тут в режимі максимальних навантажень підтримується максимально допустима напруга на шинах ЦП, а в режимі мінімальних навантажень – мінімальна напруга.

При цьому застосовується і так зване місцеве регулювання напруги в кожному трансформаторному пункті шляхом установки перемикача відгалужень розподільних трансформаторів в відповідне положення. У поєднанні з централізованим (в ЦП) і зазначеним місцевим регулюванням напруги застосовуються регульовані і нерегульовані конденсаторні установки, також відносяться до засобів місцевого регулювання напруги.

### **Розмах зміни напруги**

Розмах зміни напруги є різницею між амплітудними або діючими значеннями напруги до і після одиночної зміни напруги і визначається за формулою:

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{\sqrt{2}U_H} \cdot 100\% \quad (1.13)$$

де  $U_i, U_{i+1}$  – значення, які слідує один за одним екстремумів або екстремуму та горизонтальної ділянки, що огинає амплітудні значення напруги.

До розмахів зміни напруги відносять поодинокі зміни напруги будь-якої форми з частотою повторення від двох раз на хвилину (1/30 Гц) до одного разу в годину, що мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1 секунду (для ламп розжарювання) і 0,2 секунду для інших приймачів.

Швидкі зміни напруги викликаються ударним режимом роботи двигунів металургійних прокатних станків тягових установок залізниць, лугових сталеплавильних печей, зварювальної апаратури, а також частими пусками потужних короткозамкнутих асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність складає декілька відсотків потужності короткого замикання.

Число змін напруги в одиницю часу, тобто частота зміни напруги, знаходиться по формулі  $F = m/T$ , де  $m$  – число змін напруги за час  $T$ ,  $T$  – загальний час спостереження розмахів напруги.

Основні вимоги, до коливань напруги, обумовлюються міркуваннями захисту зору людини. Встановлено, що найбільша чутливість ока до мерехтіння світла знаходиться в області частоти, рівної 8,7 Гц. Тому для ламп розжарювання, що забезпечують робоче освітлення при значній зоровій нарузі, роз-



мах напруги допускається не більше за 0,3 % для лампи накаливання в побут і 0,4 % для люмінесцентних ламп і інших електроприймачів – 0,6 %.

Розмахи коливань, що допускаються, приведені на рис. 1.4.

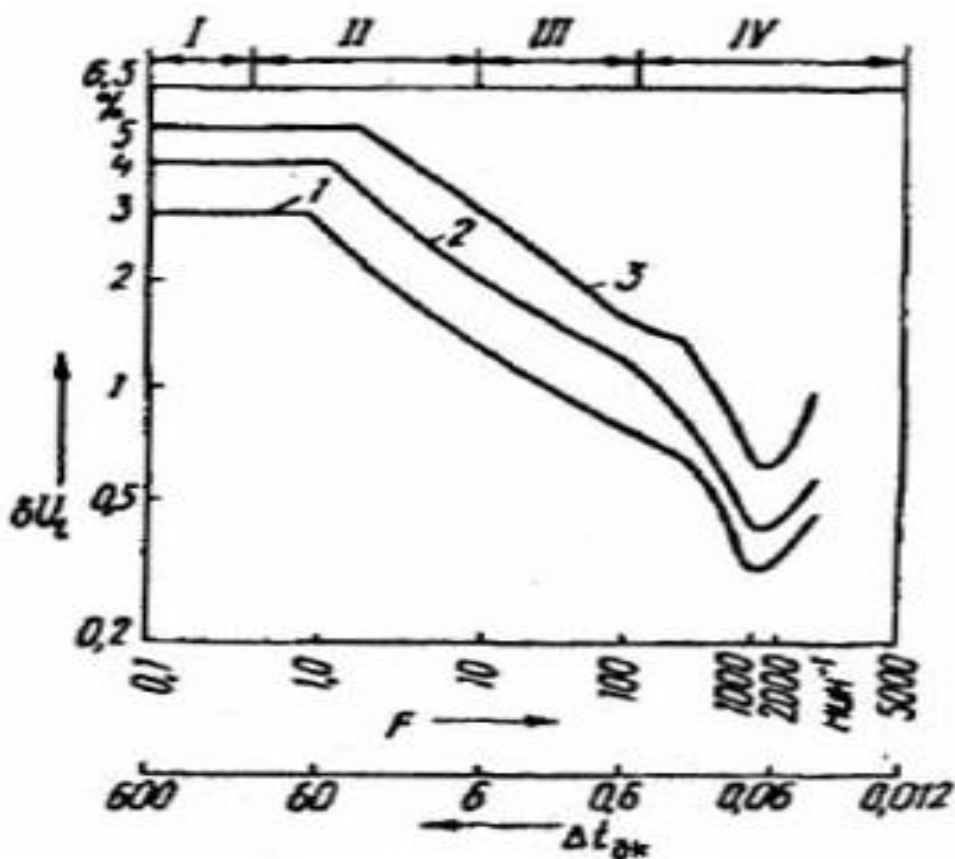


Рисунок 1.4 – Допустимі розмахи коливання напруги: 1 - робоче освітлення лампами розжарювання при великій зоровій напрузі, 2 - побутові лампи розжарювання, 3 - люмінесцентні лампи

Область I відповідає роботі насосів і побутових приладів, II - кранів, підйомників, III - дугових печей, ручному контактному зварюванню, IV - роботі поршневих компресорів і автоматичному контактному зварюванню.

Для зниження розмаху зміни напруги в освітлювальній мережі застосовують роздільне живлення приймачів освітлювальної мережі і

силового навантаження від різних силових трансформаторів, подовжню ємнісну компенсацію живлячої мережі, а також синхронні електродвигуни і штучні джерела реактивної потужності (реактори або конденсаторні батареї, струм яких формується за допомогою керованих клапанів для отримання необхідної реактивної потужності).

### **Доза коливань напруги**

Доза коливань напруги ідентична розмаху зміни напруги і в діючих електричних мережах вводиться у міру їх оснащення відповідними приладами. При використанні показника "доза коливань напруги" оцінка допустимості розмаху зміни напруги може не робитися, оскільки дані показники взаємозамінні.

Доза коливань напруги також є інтегральною характеристикою коливань напруги, що викликають у людині накопичуюче за встановлений період часу роздратування із-за мигань світла в діапазоні частот від 0,5 до 0,25 Гц.

Допустиме максимальне значення дози коливань напруги ( $\psi$ , %) в електричній мережі, до якої приєднуються освітлювальні установки, не повинне перевершувати: 0,018 - з лампами розжарювання в приміщеннях, де потрібно значну зорову напругу; 0,034 - з лампами розжарювання в усіх інших приміщеннях; 0,079 - з люмінесцентними лампами.

### **Коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги**

При роботі в мережах потужних випрямних і перетворювальних установок, а також дугових печей і установок для зварювання, тобто нелінійних елементів, відбувається спотворення кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги є гармонійними коливаннями, що мають різні частоти (промислова частота - це нижча гармоніка, усі інші по відношенню до неї - вищі гармоніки).

Вищі гармоніки в системі електропостачання викликають додаткові втрати енергії, скорочують термін служби косинусних конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів, призводять до труднощів при наладці релейного захисту і сигналізації, а також експлуатації електроприводів з управлінням тиристора і т. д.

Зміст вищих гармонік в електричній мережі характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності кривої напруги  $K_{\text{нс}U}$ , який визначається за виразом:

$$K_{\text{нс}U} = \frac{1}{U_{\text{н}}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100\% , \quad (1.14)$$

де  $N$  – порядок останньої з врахованих гармонійних складових,

$U_n$  – діюче значення  $n$ -ої ( $n = 2 \dots N$ ) гармонійної складової напруги, кВ.

Нормальні і максимальні допустимі значення  $K_{\text{нс}U}$  не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ - 5 і 10 %, в електричній мережі 6 - 20 кВ - 4 і 8 %, в електричній мережі 35 кВ - 3 і 6 %, в електричній мережі 110 кВ і вище 2 і 4 %.

Для зниження вищих гармонік застосовуються силові фільтри, що є послідовним з'єднанням індуктивного і ємнісного опорів, налагоджених в резонанс на певну гармоніку. З метою виключення гармонік нижчих частот застосовують перетворювальні установки з великим числом фаз.

**Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку**

Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку є відношенням діючого значення  $n$ -ої гармонійної складової напруги до діючого значення напруги основної частоти, тобто

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_H} \cdot 100\%.$$

За значенням коефіцієнта  $K_{U(n)}$  визначається спектр  $n$ -х гармонійних складових, на пригнічення яких мають бути розраховані відповідні силові фільтри.

Нормальні і максимальні допустимі значення не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ - 3 і 6 %, в електричній мережі 6 - 20 кВ 2,5 і 5 %, в електричній мережі 35 кВ - 2 і 4 %, в електричній мережі 110 кВ і вище 1 і 2 %.

### **Несиметрія напруги**

Несиметрія напруги виникає із-за навантаження однофазних електроприймачів. Оскільки розподільні мережі напругою вище 1 кВ працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю, то несиметрія напруги обумовлена появою напруги зворотної послідовності. Несиметрія проявляється у вигляді нерівності лінійної і фазної напруги і характеризується **коефіцієнтом зворотної послідовності напруги**:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_H} \cdot 100\%, \quad (1.15)$$

де  $U_{2(1)}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруги, кВ.

Значення величини  $U_{2(1)}$  можна отримати виміром трьох напруг основної частоти, тобто  $U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$ . Тоді

$$U_{2(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{A(1)} y_A + U_{B(1)} y_B + U_{C(1)} y_C)}{y_A + y_B + y_C}, \quad (1.16)$$

де  $y_A, y_B, y_C$  – провідність фаз А, В і С приймача.

У мережах напругою вище 1 кВ несиметрія напруги проявляється в основному із-за однофазних електротермічних установок (дугових печей побічної дії, печей опору, індукційних каналъних печей, установок електрошлакової переплавки та ін.).

Наявність напруги зворотної послідовності призводить до додаткового нагріву обмоток збудження синхронних генераторів і збільшенню їх вібрації, до додаткового нагріву електродвигунів і різкого скорочення терміну служби їх ізоляції, зниження реактивної потужності, генерованої силовими конденсаторами, додаткового нагріву ліній і трансформаторів, збільшенню кількості неправильних спрацьовувань релейного захисту і т. д.

На затисках симетричного електроприймача нормально допустимий коефіцієнт несиметрії рівний 2 %, а максимально допустимий – 4 %.

Вплив несиметрії значно зменшується при живленні однофазних електроприймачів від окремих трансформаторів, а також при застосуванні керованих і некерованих симетруючих пристроїв, компенсуючих еквівалентний струм зворотної послідовності, споживаний однофазними навантаженнями.

У чотирипровідних мережах напругою до 1 кВ несиметрія, обумовлена однофазними приймачами, підключеними до фазної напруги, супроводжується-

ся проходженням струму в нульовому проводі і, отже, появою напруги нульової послідовності.

### **Коефіцієнт нульової послідовності напруги**

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{н.ф.}} \cdot 100\%, \quad (1.17)$$

де  $U_{0(1)}$  – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти, кВ;

$U_{н.ф.}$  – номінальне значення фазної напруги, кВ.

Величина  $U_{0(1)}$  визначається виміром трьохфазної напруги основної частоти, тобто

$$U_{0(1)} = \frac{U_{A(1)}y_A + U_{B(1)}y_B + U_{C(1)}y_C}{y_A + y_B + y_C + y_0}, \quad (1.18)$$

де  $y_A, y_B, y_C, y_0$  – провідність фаз А, В, С приймача і провідність нульового проводу;

$U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$  – діючі значення фазної напруги.

Допустиме значення  $U_{0(1)}$  обмежується вимогами, до відхилення напруга, яка задовольняється коефіцієнтом нульової послідовності, рівним 2% якості нормального рівня і 4 % максимального рівня.

Зниження значення може бути досягнуте раціональним розподілом однофазного навантаження між фазами, а також збільшенням перерізу нульового дроту до перерізу фазних проводів і застосуванням трансформаторів в розподільній мережі з групою з'єднання "зірка - зигзаг".

## Провал напруги та інтенсивність провалів напруги

**Провал напруги** – це раптове значне пониження напруги в точці електричної мережі, за яким слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня через проміжок часу від декількох періодів до декількох десятків секунд.

**Тривалість провалу напруги**  $\Delta t_{\text{пр}}$  – інтервал часу між початковим моментом провалу напруги і моментом відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня (Рис. 1.5), тобто  $\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{від}} - t_{\text{поч}}$ .

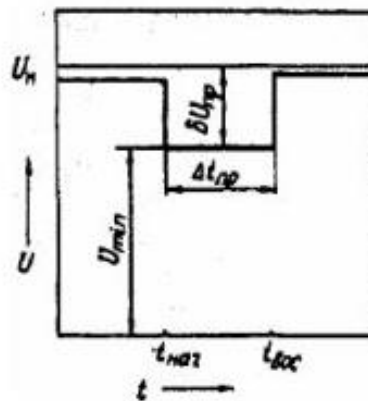


Рисунок 1.5 – Тривалість і глибина провалу напруги

Значення  $\Delta t_{\text{пр}}$  складає від декількох періодів до декількох десятків секунд. Провал напруги характеризується інтенсивністю і глибиною провалу  $\delta U_{\text{пр}}$ , що є різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням напруги  $U_{\min}$  впродовж провалу напруги, і виражається у відсотках номінального значення напруги або в абсолютних одиницях.

Величина  $\delta U_{\text{пр}}$  визначається таким чином:

$$\delta U_{\text{пр}} = \frac{U_n - U_{\min}}{U_n} \cdot 100\% \quad \text{або} \quad \delta U_{\text{пр}} = U_n - U_{\min}$$

Інтенсивність провалів напруги  $m^*$  є частотою появи в мережі провалів напруги певної глибини і тривалості, тобто

$$m^* = \frac{m(\delta U_{\text{пр}}, \Delta t_{\text{пр}})}{M} \cdot 100\% ,$$

(1.19)

де  $m(\delta U_{\text{пр}}, \Delta t_{\text{пр}})$  – число провалів напруги глибиною  $\delta U_{\text{пр}}$  і тривалістю  $\Delta t_{\text{пр}}$  за час  $T$ ;

$M$  – сумарне число провалів напруги за час  $T$ .

До провалів напруги, що виникають у більшості випадків при коротких замиканнях в мережі, чутливі деякі види електроприймачів (ЕОМ, силова електроніка), тому в проектах електропостачання таких приймачів повинні передбачатися заходи по зниженню тривалості, інтенсивності і глибини провалів напруги. Допустимі значення тривалості провалів напруги ГОСТ не вказує.

### **Імпульсна напруга**

Імпульсна напруга – це різка зміна напруги, за якою слідує відновлення напруги до звичайного рівня за проміжок часу від декількох мікросекунд до 10 мілісекунд. Воно є максимальним миттєвим значенням напруги імпульсу  $U_{\text{імп}}$  (Рис. 1.6).



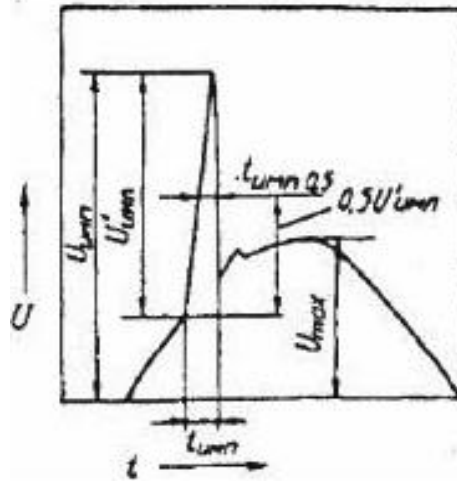


Рисунок 1.6 – Імпульсна напруга

Імпульсна напруга характеризується амплітудою імпульсу  $U'_{\text{імп}}$ , що є різницею між імпульсом напруги і миттєвим значенням напруги основної частоти, що відповідає моменту початку імпульсу. Тривалість імпульсу  $t_{\text{імп}}$  – інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до звичайного рівня. Може бути порахована тривалість імпульсу  $t_{\text{імп } 0,5}$  за рівнем 0,5 його амплітуди (див. рис. 1.6).

Імпульсна напруга визначається у відносних одиницях за формулою:

$$\Delta U_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{\sqrt{2}U_{\text{н}}} \quad (1.20)$$

До імпульсів напруги чутливі також такі електроприймачі, як ЕОМ, силова електроніка та ін. Імпульсна напруга з'являється внаслідок комутацій в електричній мережі. Заходи по зниженню імпульсної напруги повинні передбачатися при розробці конкретних проектів електропостачання. Допустимі значення імпульсної напруги ГОСТ не вказує.

## Відхилення частоти

Зміни частоти обумовлені змінами сумарного навантаження і характеристиками регуляторів частоти обертання турбін. Великі відхилення частоти виникають в результаті повільної регулярної зміни навантаження при недостатньому резерві активної потужності.

Частота напруги на відміну від інших явищ, погіршуючих якості електроенергії, є загальносистемним параметром: усі генератори, приєднані до однієї системи, генерують електроенергію на напрузі однакової частоти - 50 Гц.

Згідно з першим законом Кирхгофа завжди існує чіткий баланс між виробленням і генерацією потужності. Тому будь-яка зміна потужності навантаження викликає зміну частоти, що призводить до зміни вироблення активної потужності генераторів, тому блоки "турбіна - генератор" обладнали пристроями, що дозволяють регулювати надходження енергоносія в турбіну залежно від змін частоти в електричній системі.

При певному зростанні навантаження виявляється, що потужність блоків "турбіна - генератор" вичерпана. Якщо навантаження продовжує збільшуватися, баланс встановлюється при зниженій частоті – виникає відхилення частоти. В цьому випадку говорять про дефіцит активної потужності для підтримки номінальної частоти.

Відхилення частоти  $\Delta f$  від номінального значення  $f_H$  визначається за формулою:

$$\Delta f = f - f_H, \quad (1.21)$$

де  $f$  – поточне значення частоти в системі.

Зміни частоти, що перевищують 0,2 Гц, істотно впливають на техніко-економічні показники роботи електроприймачів, тому нормальне допустиме значення відхилення частоти дорівнює  $\pm 0,2$  Гц, а максимально допустиме значення відхилень частоти складає  $\pm 0,4$  Гц. У післяаварійних режимах допускається відхилення частота від 0,5 Гц до 1 Гц напруязі не більше ніж 90 годин в рік.

Відхилення частоти від номінальної призводить до збільшення втрат енергії в мережі, а також до зниження продуктивності технологічного устаткування.

Характерні властивості електроенергії, необхідні для визначення вимог до системи показників якості електроенергії (ПЯЕ), полягають в:

1. При симетрії і синусоїдальності трифазної системи напруг і значеннях напруги і частоти, рівних або близьких до номінальних для електроустаткування, вимоги по ЯЕ: економічності, естетичності, ергономичності. Найбільша ефективність може бути досягнута при деяких відступах від вказаних умов.

2. Якщо умови п. 1 не задовольняються, з'являються негативні дії на споживачів. Ці дії мають як загальні, так і специфічні особливості залежно від характеру порушення, пов'язаного з пониженням ЯЕ. Це необхідно враховувати при встановленні системи ПЯЕ.

3. Несприятливий вплив на споживачів може виявлятися як постійно, шляхом накопичення необоротних змін (брак або недоотпуск продукції, старіння ізоляції і ін.), так і стрибкоподібно (відмови або збої в роботі автоматичних пристроїв, вибухи батарей конденсаторів і ін.). Ця обставина свідчить про необхідність обмеження допустимих значень ПЯЕ, що визначають вказані негативні дії.

4. Електромагнітні та інші характеристики електричних систем і систем електропостачання споживачів змінюються в часі, як правило, по імовірнісних законах, тому ПЯЕ є випадковими величинами.

Генератори. Працюють з регуляторами напруги, більшість з генераторів працюють в режимі сталої напруги. Не залежно від навантаження напруга на затискачах підтримується на 5% вищою від номінальної напруги електромережі.

$$Y^{100}_r = Y^{25}_r = + 5\%$$

В режимі зустрічного регулювання напруга регулюється пропорційно навантаженню

$$Y^{100}_r = + 10\% \text{ і } Y^{25}_r = 0$$

Воно використовується тільки для електростанцій, що працюють ізольовано.

Генератори електростанцій електричних систем працюють в режимі сталої напруги.

Трансформатори. Для компенсації втрати напруги в обмотках трансформатора є стала надбавка + 5%.

Крім цього сучасні трансформатори мають (ПБЗ) або (РПН).

Відмінності в застосуванні для регулювання напруги ПБЗ чи РПН трансформаторів в першу чергу визначаються відмінністю можливостей цих пристроїв регулювання.

ПБЗ — перемикання без збудження здійснюється на повністю вимкненому трансформаторі (за відсутності збудження, тобто за відсутності магнітного потоку в магнітопроводі). Повністю вивести трансформатор з роботи вдається доволі рідко, тому ПБЗ звичайно здійснюється раз в декілька

місяців (раз на сезон). В результаті, трансформатор, що має регулювання типу ПБЗ, звичайно працює з одним коефіцієнтом трансформації за всіх добових, тижневих і місячних змінах навантаження.

РПН – регулювання під навантаженням може здійснюватися на трансформаторі, що несе навантаження, тобто практично в будь-який момент часу. Це, звичайно, універсальніший і зручніший пристрій, але оскільки він потребує спеціальної апаратури, здатної комутувати робочий струм навантаження трансформатора, він і значно дорожчий. Тому встановлення його повинно мотивуватися об'єктивною необхідністю.

ПБЗ та РПН відрізняються глибиною і кроком регулювання. Якщо ПБЗ трансформаторів має можливість регулювати напругу в діапазоні  $\pm 5\%$  з кроком в  $2,5\%$  (скорочено пишуть  $\pm 2 \times 2,5\%$ ), то РПН має діапазон до  $\pm 16\%$  і більше з кроком від  $1,23\%$  до  $2,5\%$  (наприклад,  $\pm 9 \times 1,78\%$ ).

Спільним для ПБЗ та РПН є те, що вони встановлюються на обмотках вищої напруги двообмоткових трансформаторів і за можливості зі сторони нейтралі. Перше дозволяє полегшити контактну систему і комутаційну апаратуру, оскільки на стороні вищої напруги менші струми. А друге дозволяє полегшити ізоляцію цих перемикаючих пристроїв відносно землі та між фазами, оскільки потенціали зі сторони нейтралі нижчі, ніж потенціали лінійних виводів трансформаторів.

#### Регулювання за допомогою ПБЗ

Після визначення значень відхилень напруги в мережі для номінальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів в максимальному, мінімальному і післяаварійному режимах роботи їх порівнюють з допустимими за ГОСТ.

Для того, щоб не визначати відхилення напруги на всіх електроприймачах мережі, виділяють два характерних: ближній і віддалений. Ближнім електроприймачем вважають той, що приєднаний найближче до шин підстанції (звичайно це відхилення напруги безпосередньо на шинах підстанції). Віддалений електроприймач – той, до якого втрати напруги найбільші, рахуючи від шин підстанції.

У випадку необхідності регулювання напруги в першу чергу слід намагатися виправити режим напруги з допомогою ПБЗ.

Регулювання напруги з допомогою ПБЗ досягає мети за виконання таких трьох умов:

- у всіх режимах навантаження недопустимі згідно ГОСТ відхилення напруги мають однаковий знак (всі відхилення в один бік від номінальної напруги);
- діапазон відхилення напруги на електроприймачах, що живляться від підстанції, у всіх режимах не перевищує допустимий за ГОСТ;
- існує можливість не вийти за межі ГОСТ зі зміною напруги в мережі, хоч би на один крок ПБЗ, в бік необхідного регулювання.

Розглянемо використання цих умов на прикладі режимів напруги, наведених в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Режими напруги електроприймачів

Режими і навантаження	Відхилення на ближньому електроприймачі $U_{\text{бл}}$	Відхилення на віддаленому електроприймачі $U_{\text{від}}$	Допустимі відхилення по ГОСТ
Максимальний	+7	+1	від –5 до +5

\

Продовження Таблиці 1.2

Мінімальний	+5,5	+1	від -5 до +5
Післяаварійний	+1	-5	від -7,5 до +5

Аналіз відхилень напруги, наведених в таблиці 1.2, показує, що за межі, які нормуються ГОСТ, виходить відхилення напруги на ближньому електроприймачі в максимальному і мінімальному режимах. Причому, в обох випадках вони вищі допустимого ГОСТ (+7% і +5,5%), тобто мають однаковий знак (+). В результаті перша умова виконується. Щоб виправити режим напруги, необхідно знизити напругу на цих електроприймачах.

Вимоги третьої умови також виконуються, тому що, зниження напруги на один крок ПБЗ, тобто на 2,5%, не знижуємо до недопустимого рівня напруги на віддаленому електроприймачі. Найбільше допустиме зниження напруги в робочих режимах характеризується відхиленням -2,5%, а після зміни відгалуження ПБЗ на віддаленому приймачі буде:

- в максимальному режимі  $U_{\text{від}} = +1 - 2,5\% = -1,5\%$ ;
- в мінімальному режимі  $U_{\text{від}} = +2 - 2,5\% = -0,5\%$ .

Отже, згідно з третьою умовою наявності запас відхилень напруги в сторону регулювання (тут в сторону пониження напруги).

Виконується і друга умова, оскільки допустимий діапазон відхилень напруг в мережі в максимальному і мінімальному режимах (робочі режими) згідно стандарту

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_{\text{доп max}} - U_{\text{доп min}} = +5\% - (-2,5)\% = 7,5\% ,$$

а діапазон дійсних відхилень напруги згідно даних таблиці

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_{\text{max}} - U_{\text{min}} = 7\% - 1\% = 6\% ,$$

тобто

$$\Delta U < \Delta U_{\text{доп}}$$

В післяаварійному режимі,

$$\Delta U_{\text{доп}} = +5\% - (-7,5)\% = 12,5\%$$

$$\Delta U = 7\% - (-5\%) = 12\% .$$

І в цьому випадку  $\Delta U < \Delta U_{\text{доп}}$

Таким чином, всі три умови для можливості використання ПБЗ виконуються.

Спробуємо покращити напругу з допомогою ПБЗ. Дійсно, поставивши перемикач ПБЗ в положення +2,5%, що відповідає зниженню напруги зі сторони навантаження майже на 2,5%, одержимо, для ближнього ( $U_{\text{бл}}$ ) та віддаленого ( $U_{\text{від}}$ ) електроприймачів.

Таблиця 1.3 – Режими напруги електроприймачів

Режими	$U_{\text{бл}}$	$U_{\text{від}}$
максимальний	+4,5	-1,5
мінімальний	+3	-0,5
післяаварійний	-1,5	-7,5

Тобто в межах стандарту.

Насправді, поставивши перемикач ПБЗ в положення +2,5%, ми збільшуємо кількість витків первинної обмотки на 2,5%, а напруга зі сторони



обмотки нижчої напруги знизиться в порівнянні з роботою з номінальним коефіцієнтом трансформації до:

$$U_{\text{нн}}^* = 1/1,025 = 0,9756,$$

тобто на 2,44% чи трохи менше, ніж збільшення кількості витків обмотки ВН. Особливо сильно ця невідповідність проявляється у випадку глибокого регулювання зі сторони обмотки ВН. Наприклад, вже зі збільшенням кількості витків на обмотці ВН на 10% зниження напруги зі сторони НН досягає:

$$U_{\text{нн}}^* = 1/1,1 = 0,909,$$

тобто нижче лише на 9,1%.

Регулювання напруги за допомогою РПН.

На відміну від використання ПБЗ необхідні коефіцієнти трансформації (чи ступінь регулювання напруги) РПН визначається для кожного режиму навантаження зокрема. Умови успішного застосування РПН можуть бути одержані з умов, сформульованих для ПБЗ, але з врахуванням специфіки РПН. Їх дві:

1. Діапазон відхилення напруг на електроприймачах мережі, що живляться від підстанції, в режимі, який розглядається, не перевищує допустимий за стандартом;
2. Існує можливість не вийти за межі ГОСТ зі зміною відхилень напруги в мережі, хоч би на один крок РПН, в сторону необхідного регулювання.

Аналіз цих умов відбувається аналогічно тому, який показано для ПБЗ.

## Висновки за розділом 1

Отже, якість електричної енергії – це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначення.

На електростанціях виробляють електроенергію досить високої якості, а погіршення її якості відбувається в процесі передачі і споживання, в результаті впливу електричних приймачів. Таким чином, необхідно розрізняти якість електроенергії енергозабезпечуючої організації і якість споживаної електроенергії.

Причинами, що знижують якість електричної енергії є: зміна структури енергоносіїв; збільшення числа могутніх приймачів електричної енергії; дія нелінійних навантажень; посилення взаємного впливу різних видів електрообладнання (Для характеристики цього впливу використовується поняття «електромагнітна сумісність» (ЕМС). Під ЕМС розуміється «здатність пристрою або системи задовільно функціонувати в його електромагнітному оточенні». ЕМС визначає міру взаємного впливу електрообладнання, при якій відсутні порушення нормальної роботи і зниження ефективності роботи нижче певної економічно обґрунтованої межі.

До сучасних методів оцінювання якості електричної енергії варто віднести:

1. Метод середньоквадратичних значень. На основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією;

2. Фільтри Калмана. Спрощує вимоги моделювання для частоти та оцінки амплітуди сигналу. Використання  $\alpha\beta$ -трансформації для аналізу енергосистеми;

3. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Основою функцією данного методу є те, що можливо трансформувати сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонент.

Один із методів обробки сигналів є спектральний аналіз, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу.

Таким чином, аналіз відповідних літературних джерел дозволив оглянути наступні методи ідентифікації типу спотворень якості електричної енергії:

1) Штучні нейронні мережі (скриті марківські моделі). Zwe-Lee Ching (2004-2012 р.);

2) На основі експертних систем. Santoso (2000 р.). Адаптивної нечіткої експертної системи. Ibrahim (2001 р.);

3) Експертні системи із нечіткою логікою. Bizjak (2006-2010 р.);

4) SVM (Support Vector Machine, метод опорних векторів) – методологія навчання за прецедентами (Bishop, Moulin, Lin, Axelberg, Roberts);

5) Комбіновані методи – штучні нейронні мережі та SVM;

6) Вейвлети та моделі Маркова, експертні системи із нечіткою логікою та Фур'є-аналіз.

До основних показників якості електричної енергії, що визначають властивості електричної енергії, які характеризують її якість, відносяться: відхилення напруги ( $\delta U_t$ , %); розмах зміни напруги ( $\delta U_t$ , %); доза коливань напруг ( $\psi$ , %); коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги ( $K_{\text{НСУ}}$ , %); коефіцієнт  $n$ -ої гармонічної складової напруги непарного (парного) порядку ( $K_{U(n)}$ , %); коефіцієнт зворотньої послідовності напруг ( $K_{2u}$ , %); коефіцієнт нульової послідовності напруг ( $K_{0u}$ , %); тривалість провалу напруги ( $\Delta t_{\text{пр}}$ , с); імпульсна напруга ( $U_{\text{імп}}$ , В, кВ); відхилення частоти ( $\Delta f$ , Гц).

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО СИГНАЛУ ТА СПОСОБУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

#### 2.1 Формування моделі вимірювального сигналу на основі ортогональних перетворень (вейвлет-аналізу)

Вейвлет-перетворення (англ. Wavelet transform) – інтегральне перетворення, яке є згортою вейвлет-функції з сигналом. Вейвлет-перетворення перетворює сигнал з часового простору в частотно-часовий [21].

Спосіб перетворення функції (чи сигналу) у форму, яка робить деякі величини початкового сигналу такими, що більше піддаються вивченню, або дозволяє стиснути початковий набір даних. Вейвлет-перетворення сигналів є узагальненням спектрального аналізу. Термін (англ. wavelet) в перекладі з англійського означає "маленька хвиля". Вейвлети – ця узагальнена назва математичних функцій певної форми, які локальні в часі і по частоті і в яких усі функції виходять з однієї базової, змінюючи її (зрушуючи, розтягуючи).

Розглянемо рисунок 2.1.

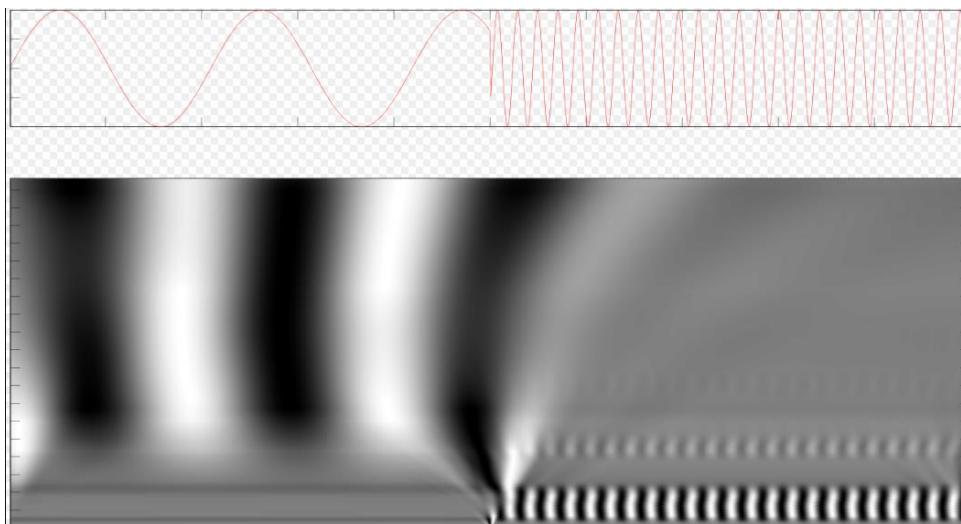


Рисунок 2.1 – Неперервне вейвлет-перетворення сигналу

### Вимоги до вейвлетів

Для здійснення вейвлет-перетворення вейвлет-функції повинні задовольняти наступним критеріям:

1) Вейвлет повинен мати кінцеву енергію:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty, \quad (2.1)$$

2) Якщо  $\psi(f)$  Фур'є-перетворення для вейвлета  $\psi(t)$ , тобто

$$\psi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i(2\pi f)t} dt,$$

(2.2)

тоді повинна виконуватися наступна умова:

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\psi(f)|^2}{f} df < \infty, \quad (2.3)$$

Ця умова називається умовою допустимості, і з неї слідує, що вейвлет при нульовій частотній компоненті повинен задовольняти умові  $\psi(0)=0$  або, в іншому випадку, вейвлет  $\psi(f)$  повинен мати середнє рівне нулю.

3) Додатковий критерій повинен бути для комплексних вейвлетів, а саме, що для них Фур'є-перетворення має бути одночасно речовим і повинно убувати для негативних частот.

4) Локалізація: вейвлет має бути безперервним, інтегрованим, мати компактний носій і бути локалізованим як в часі (у просторі), так і по частоті. Якщо вейвлет в просторі звужується, то його середня частота підвищується, спектр вейвлета переміщається в область більш високих частот і розширюється. Цей процес має бути лінійним – звуження вейвлета удвічі повинне підвищувати його середню частоту і ширину спектру також удвічі.

### Властивості вейвлет-перетворення

#### 1. Лінійність

$$WT[\alpha s_1(t) + \beta s_2(t)] = \alpha WT[s_1(t)] + \beta WT[s_2(t)], \quad (2.4)$$

## 2. Інваріантність відносно зсуву

$$\text{WT}[s(t - t_0)] = C(a, b - t_0), \quad (2.5)$$

## 3. Інваріантність відносно масштабування

$$\text{WT}[s(\frac{t}{a_0})] = \frac{1}{a_0} C(\frac{a}{a_0}, \frac{b}{b_0}), \quad (2.6)$$

Розтягування (стискування) сигналу призводить до стискування (розтягування) вейвлет-спектра сигналу.

## 4. Диференціювання

$$\text{WT}[\frac{d^n s(t)}{dt^n}] = (-1)^n \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{d^n \psi(t)}{dt^n} dt, \quad (2.7)$$

Звідси слідує, що байдуже, чи диференціювати функцію, або аналізувати вейвлет. Якщо аналізувати вейвлет заданий формулою, то це може бути дуже корисним для аналізу сигналів. Ця властивість особливо корисна, якщо сигнал заданий дискретним рядом.

## Неперервне вейвлет-перетворення

Вейвлет-перетворення для безперервного сигналу відносно вейвлет функції визначається таким чином:

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*(\frac{t-b}{a}) dt, \quad (2.8)$$

де  $\psi^*$  означає комплексне сполучення для  $\psi$ , параметр  $b \in \mathbb{R}$  відповідає часовому зсуву та називається параметром положення, параметр  $a > 0$  задає масштабування і називається параметром розтягування.

$w(a) \equiv \frac{1}{\sqrt{a}}$  – вагова функція

Ми можемо визначити нормовану функцію таким чином

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2.9)$$

що означає часове зрушення на  $b$  і масштабування за часом на  $a$ . Тоді формула вейлет-перетворення зміниться на

$$T(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^* dt, \quad (2.10)$$

Початковий сигнал може бути відновлений по формулі зворотнього перетворення

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(a,b) \psi_{a,b}(t) da db, \quad (2.11)$$

### Дискретне вейвлет-перетворення

У дискретному випадку, параметри масштабування  $a$  і зсуву  $b$  представлені дискретними величинами:

$$a = a_0^m, \quad b = nb_0$$

Тоді аналізуючий вейвлет має наступний вигляд:

$$\psi_{m,n} = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0}{a_0^m}\right), \quad (2.12)$$

де  $m$  і  $n$  – цілі числа.

У такому разі для безперервного сигналу дискретне вейвлет-преобразование і його зворотне перетворення запишуться наступними формулами:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^* dt, \quad (2.13)$$

Величини  $T_{m,n}$  також відомі як вейвлет-коефіцієнти.

$$x(t) = K_{\Psi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \Psi_{m,n}(t),$$

де  $K_{\Psi}$  – постійна нормування.

Графічне представлення вейвлет-перетворення виглядає наступним чином:

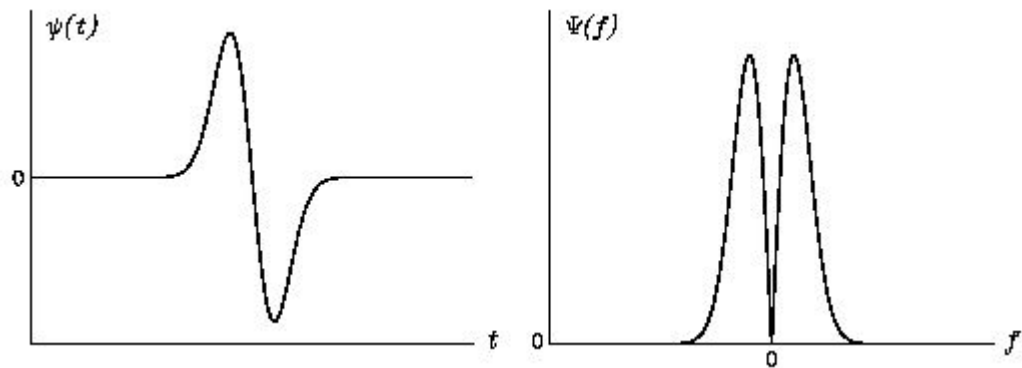


Рисунок 2.2 – Часове та спектральне представлення WAVE-вейвлета

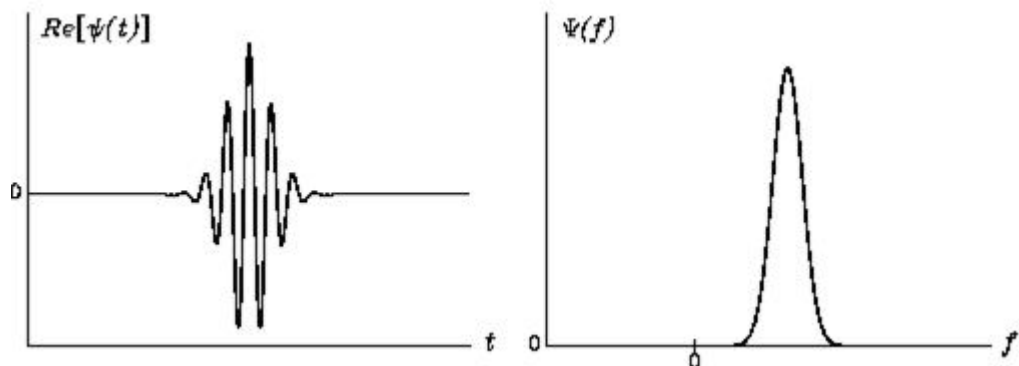


Рисунок 2.3 – Часове та спектральне представлення вейвлета Морле

Вибір конкретного виду і типу вейвлетів багато в чому залежить від аналізованих сигналів і завдань аналізу. Для отримання оптимальних алгоритмів перетворення розроблені певні критерії, але їх ще не можна вважати остаточними, оскільки вони є внутрішніми по відношенню до самих алгоритмів перетворення і, як правило, не враховують зовнішніх критеріїв, пов'язаних з сигналами і цілями їх перетворень. Звідси слідує, що при практичному використанні вейвлетів необхідно приділяти достатню увагу перевірці їх працездатності і ефективності для поставлених цілей в порівнянні з відомими методами обробки і аналізу.



Моніторинг параметрів ЯЕЕ у реальному часі неможливий на даний час тому, що їх визначення потребує часу для збору даних та статистичної обробки. Найчастіше кожен параметр ЯЕЕ потребує для свого визначення окремого алгоритму та математичного апарату. На сьогодні не існує узагальненого параметру визначення наявності довільного типу спотворень. Із науково-практичної точки зору було б доцільне розроблення способу однозначної ідентифікації погіршення ЯЕЕ у реальному часі [22].

Результати багатьох досліджень показують, що для аналізу структури сигналів різноманітної тривалості необхідні частотно-часові атоми з різноманітними часовими носіями. Тому в ортогональних перетвореннях в якості сімейства таких частотно-часових атомів, застосовують вейвлет-функцію  $\psi_{u,s}(t)$  в результаті її масштабування на величину  $s$  і зсуву на величину  $u$ :

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (2.14)$$

Ортогональне перетворення  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  від часу  $u$  і масштабу  $s$  є наступним:

$$Wf_{(u,s)} = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt, \quad (2.15)$$

де  $\langle f, \psi_{u,s} \rangle$  – скалярний добуток.

## **2.2 Розроблення ідентифікатора наявності спотворення якості електричної енергії**

З виразу (2.15), вейвлет-перетворення може фокусуватися на локальних структурах сигналу за допомогою процедури наближення та віддалення об'єктів, яка поступово зменшує або збільшує масштабний параметр [22]. Особливості і негладкі структури сигналу, як правило містять основну інформацію про його характеристики. Так, як локальна гладкість сигналу

характеризується зменшенням амплітуди вейвлет перетворення зі зменшенням масштабу, деталізація місць (аномалій) у сигналі проводиться шляхом аналізу їх локальних максимумів [23].

Щоб охарактеризувати структури з особливостями (зміна параметрів сигналу у електричній мережі), необхідно надати точне кількісне відображення гладкості сигналу  $f(t)$ . Для цього слід застосувати показники Ліпшиця, за допомогою яких можна виміряти рівномірну гладкість на часових інтервалах та у довільній точці  $v$ . Якщо функція  $f(t)$  при  $t=v$ , то це означає, що функція не диференційована в цій точці, то показник Ліпшиця при  $t=v$  характеризує сингулярну поведінку функції.

Зменшення амплітуди коефіцієнтів вейвлет-перетворення в залежності від масштабу зв'язано з рівномірною і точковою гладкістю сигналу Ліпшиця. Вимірювання асимптотичного убуття дорівнює наближення структур сигналу при масштабі, який прямує до нуля. Нехай вейвлет  $\psi$  має  $n$  нульових моментів та належить  $C^n$  ( $n$  – разів безперервна диференційована функція) з швидко спадаючими похідними. Тобто, для довільних  $0 \leq k \leq n$  та  $m \in \mathbb{N}$  ( $\mathbb{N}$  – множина додатних значень чисел, також і нуль) існує певна константа  $C_m$ :

$$\forall t \in \mathbb{R} |\psi^{(k)}(t)| \leq \frac{C_m}{1+|t|^m}.$$

Теорема, яка зв'язує рівномірну гладкість Ліпшиця  $f(t)$  на певному інтервалі з амплітудою її вейвлет-перетворення при малих масштабах [6,23]. Якщо  $f \in L^2(\mathbb{R})$  відповідає умові Ліпшиця  $\alpha, \alpha \leq n$ , на відповідному інтервалі  $[a,b]$ , то існує  $A > 0$ :

$$\forall (u,s) \in [a,b] \times \mathbb{R}^+ |Wf(u,s)| \leq A s^{\alpha+1/2}. \quad (2.16)$$

Отримана нерівність (2.16) є умовою асимптотичного спадання  $|Wf(u,s)|$ , якщо  $s$  прямує до нуля. Перевіримо на прикладі вейвлет-аналізу досліджуваного сигналу із наявністю розривів першого роду (рис. 2.4).

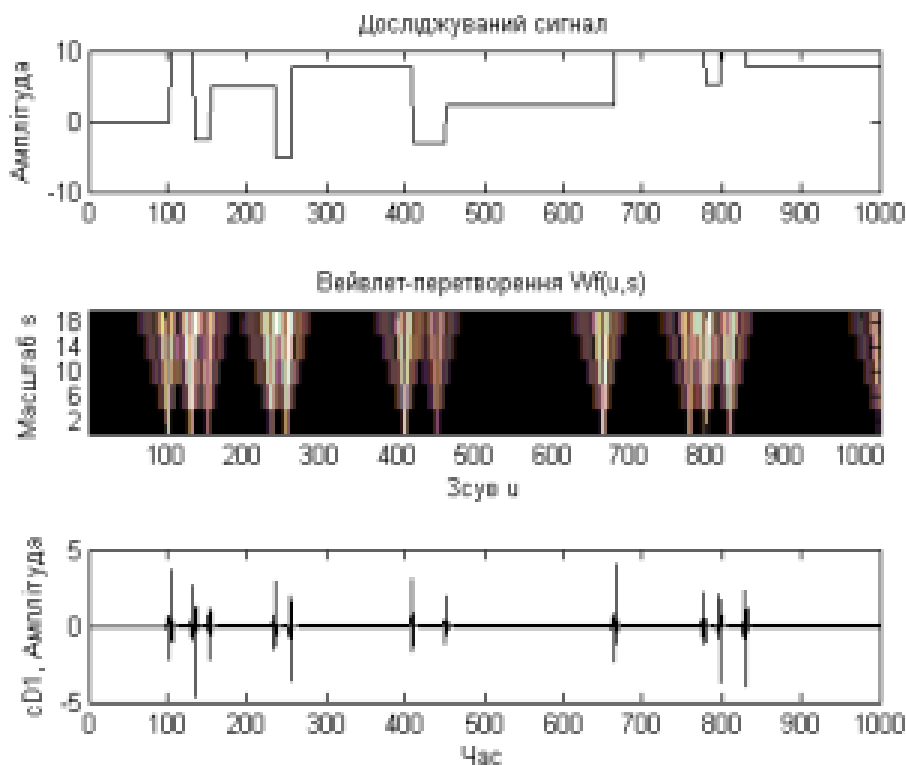


Рисунок 2.4 – Вейвлет перетворення  $Wf(u,s)$  обчислене для сигналу  $f(t)$ , зсув  $u$  та масштаб  $s$  змінюються відповідно вздовж горизонтальної та вертикальної осей

З рис.2.4, при зменшенні масштабу функція  $|Wf(u,s)|$  являє собою дрібномасштабні зміни довкілля  $u$ . Чорні, сірі та білі точки показують відповідно додатні, нульові та від'ємні вейвлет-коефіцієнти [23].

Зменшення амплітуди вейвлет-перетворення не вимірюється у масштабно-часовій площині  $(u,s)$ , а контролюється за його максимальним значенням. Термін «максимум модуля» буде використовуватись для опису довільної точки  $(u_0, s_0)$ , при  $|Wf(u,s)|$  має локальний максимум в точці  $u=u_0$ .

Так, як інформаційні потоки в електроенергетиці представлені у вигляді дискретних часових рядів, треба застосовувати дискретне вейвлет-перетворення.

У дискретному представленні вейвлет-перетворення неперервної функції  $f(t)$ , яка обирається рівномірно з кроком  $N^{-1}$  на певному інтервалі  $[0$  до  $1]$ , може бути обчислено з масштабом  $N^{-1} < s < 1$ . Дискретний сигнал  $f[n]$  тривалістю  $N$ . Тобто, його дискретне вейвлет-перетворення обчислюється для певних масштабів  $s=a^j$ , де  $a=2^{1/v}$ , а  $v$  являє собою проміжні масштаби в кожному напівінтервалі  $[2^j, 2^{j+1}]$ .

Припустимо, що  $\psi(t)$  – певний вейвлет, відповідно носій якого міститься на інтервалі  $[-K/2, K/2]$ . При  $2 \leq a^j \leq NK^{-1}$  дискретний вейвлет, масштабований на  $a^j$ , знаходиться за наступною формулою:

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{n}{a^j}\right).$$

Даний дискретний вейвлет має  $Ka^j$  ненульових значень на певному інтервалі  $[-N/2, N/2]$ .

Масштаб  $a^j$  повинен відповідати певному значенню більше 2, в іншому випадку крок вибірки має бути більше носія вейвлета. При обчисленні найменший масштаб вейвлет-перетворення обмежується розділенням дискретних даних. З [23], дискретне вейвлет-перетворення знаходиться з масштабом  $2^j \geq s \geq \mu N^{-1}$ , де  $\mu$  повинно бути дуже великим значенням, для того, щоб усунути вплив недостатньо точної вибірки на вейвлети найменшого масштабу. Отже, найбільший масштаб  $2^j$  потрібно вибирати таким чином, щоб він був менший, ніж відстань між двома послідовними особливостями у часі, щоб уникнути впливу інших особливостей на  $Wf(u, s)$ .

При кожному масштабі  $2^j$  представлення максимуму має значення  $Wf(u, 2^j)$ , де  $|Wf(u, 2^j)|$  відповідає локальному максимуму. Тоді, коли значення функції  $f(t)$  зміщене на час  $\tau$ , кожне з  $Wf(u, 2^j)$  також зміщене на час  $\tau$ , як і відповідно їх максимуми.

## Висновки за розділом 2

Вейвлет-перетворення (англ. Wavelet transform) – це інтегральне перетворення, яке є згортою вейвлет-функції з сигналом. Вейвлет-перетворення перетворює сигнал з часового простору в частотно-часовий.

Таким чином, в ортогональних перетвореннях набуло застосування вейвлет-функція  $\psi_{u,s}(t)$ :

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right).$$

В залежності від часу  $u$  та масштабу  $s$ :

$$Wf_{(u,s)} = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt.$$

Було розроблено ідентифікатор наявності якості електричної енергії, що чітко спостерігається з рисунку 2.4. Показники Ліпшиця, які дозволяють виміряти рівномірну гладкість на часових інтервах, а також у довільній точці  $u$ . Умовою асимптотичного спадання  $|Wf(u,s)|$ , якщо  $s$  прямує до нуля є:

$$\forall (u,s) \in [a,b] \times \mathbb{R}^+ \mid Wf(u,s) \leq A s^{\alpha+1/2}.$$

Інформаційні потоки в електроенергетиці представлені у вигляді дискретних часових рядів, тому треба застосовувати дискретне вейвлет-перетворення.

Дискретне вейвлет-перетворення має наступний вигляд:

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{n}{a^j}\right).$$

## РОЗДІЛ 3

### АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Порівняльний аналіз результатів обробки вимірювального сигналу за допомогою розробленого способу та Фур'є перетворення

Для перевірки адекватності теоретичного рішення та його практичну значимість проведемо порівняльний аналіз результатів обробки сигналів за допомогою Фур'є та вейвлет-аналізу [22]. Розглянемо моделі двох характерних видів сигналів, перший – це наявність стрибків першого роду (рис. 3.1, а, та рис. 3.2, а), другий – одночасна наявність у сигналі декількох гармонік – третьої та п'ятої (рис. 3.1, б та рис. 3.2, б).

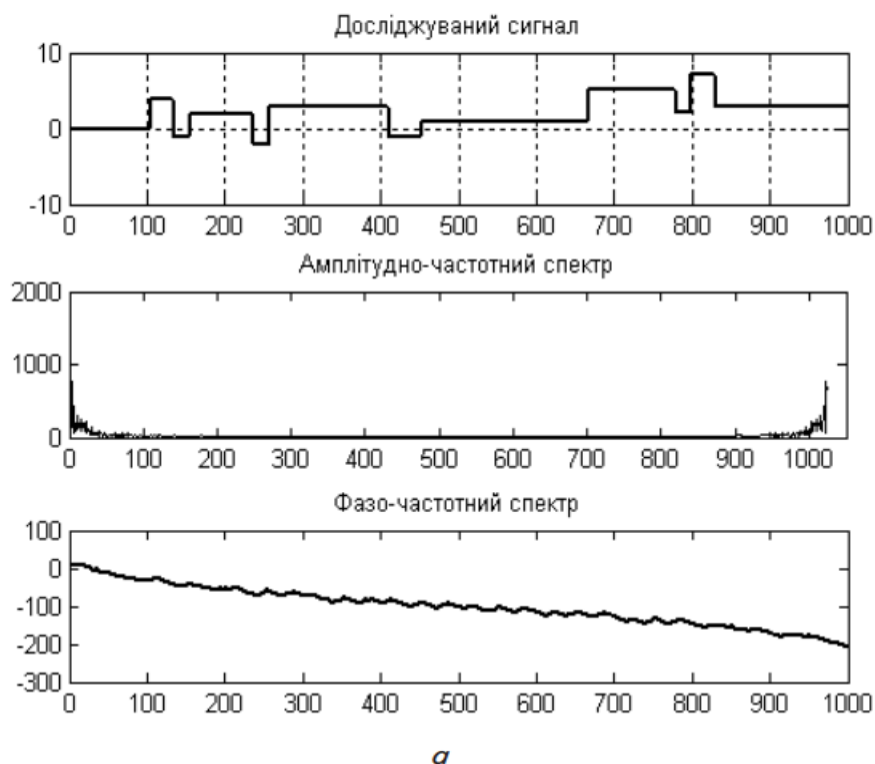
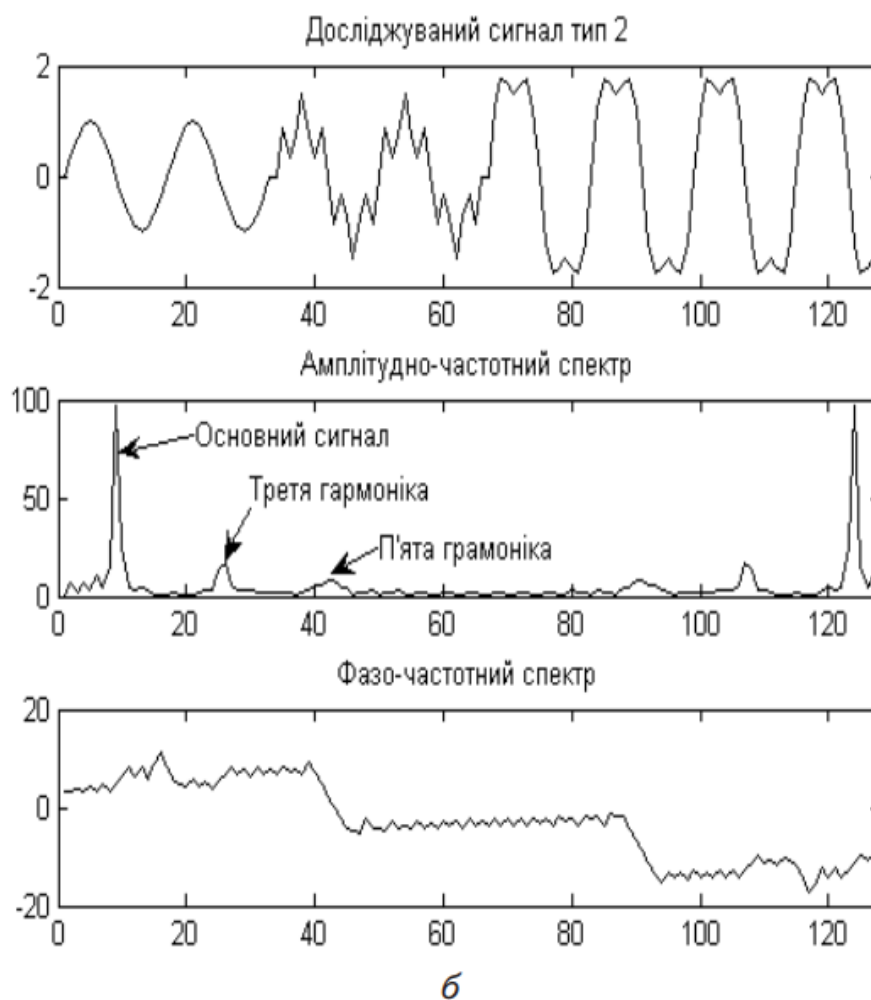


Рисунок 3.1 – Результати проведення Фур'є-аналізу сигналів із наявністю: а – розривів першого роду (перепадів амплітуди) та б – третьої та п'ятої гармонік

Продовження Рисунок 3.1



На рис. 3.2, а  $cD1$  –  $cD4$  – деталізуючі коефіцієнти вейвлет-перетворення першого – четвертого рівня ( $j$ = від 1 до 4).

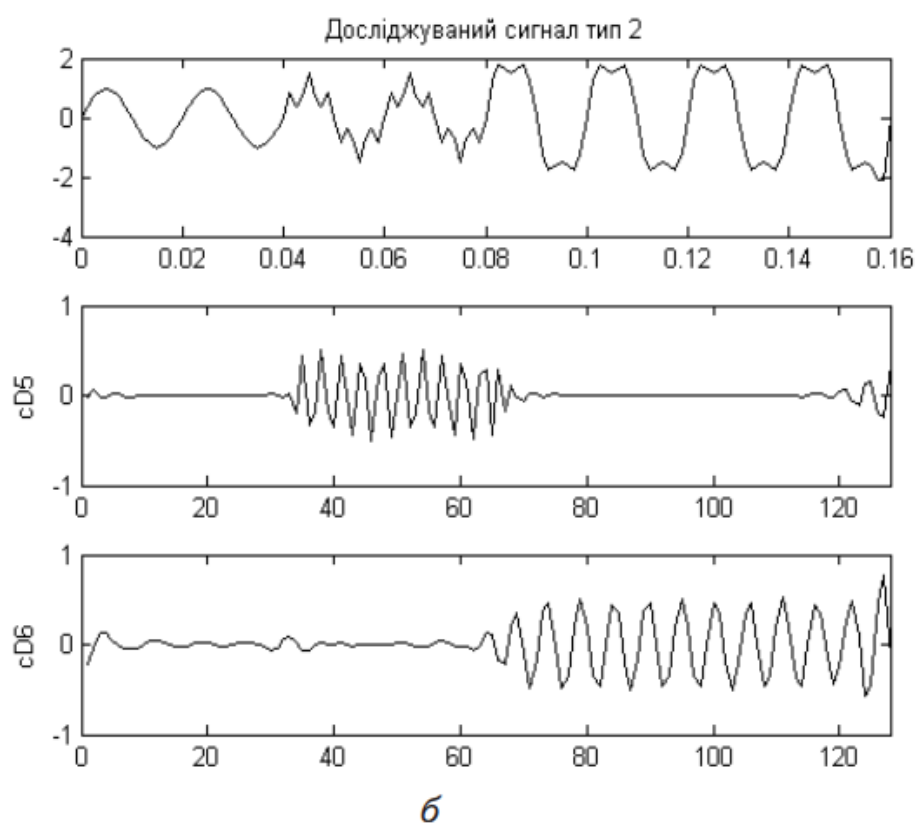
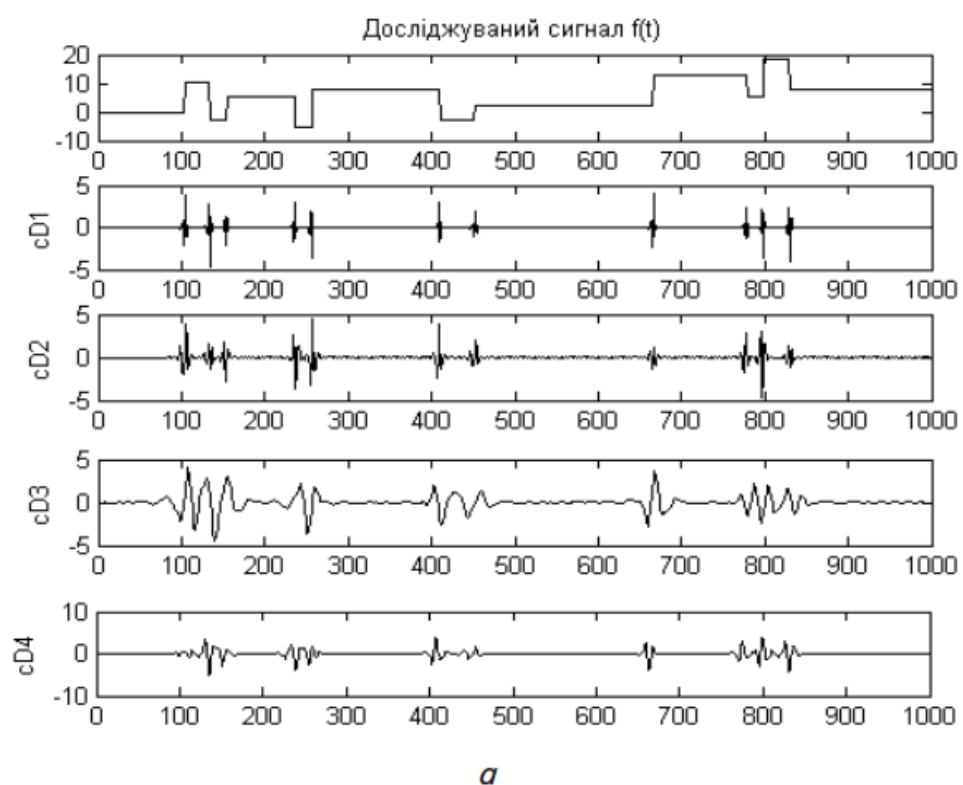


Рисунок 3.2 – Результати проведення вейвлет-аналізу для сигналів із наявністю: а – розривів першого роду (перепадів амплітуди) та б – третьої та п'ятої гармонік



Результати Фур'є-аналізу свідчать про наявність аномалій у сигналі (рис. 3.1, а) та наявність третьої та п'ятої гармоніки (рис. 3.1, б), але без ідентифікації часу їх виникнення та тривалості. Результати вейвлет-аналізу, які представлені на рис. 3.2, а, показують наступне. Значення вейвлет-коефіцієнтів першого рівня вейвлет-аналізу ( $Wf(u, 2^1)$ ) – cD1 свідчать про наявність аномалій у сигналі, характеризують час їх виникнення та тривалість. Зменшення масштабу вейвлет-перетворення дозволяє деталізувати аномалії (cD2 – cD4). Рівень розкладання залежить від частоти дискретизації, яка обирається відповідно до теореми Котельникова. У нашому випадку при частоті дискретизації 12,8 кГц маємо 1024 дискретних значення, що відповідає рівню вейвлет-декомпозиції  $j = \lceil \log(1024) \rceil = 7$ . Аналіз рис. 3.2, б показує не тільки наявність у сигналі третьої та п'ятої гармоніки (частотний діапазон cD5 відповідає 200–400 Гц, а cD6 – 100–200 Гц), а і їх тривалість.

Таким чином застосування вейвлет-перетворення дозволяє виявити час виникнення спотворень сигналу, та їх тривалість за рахунок порівневого послідовного зменшення масштабу і тим самим розбиття сигналу на частотні піддіапазони.

Проаналізуємо вплив наявності спотворень, які присутні в інформаційному сигналі, на результати його ортогонального перетворення (рис. 3.3 – 3.6).

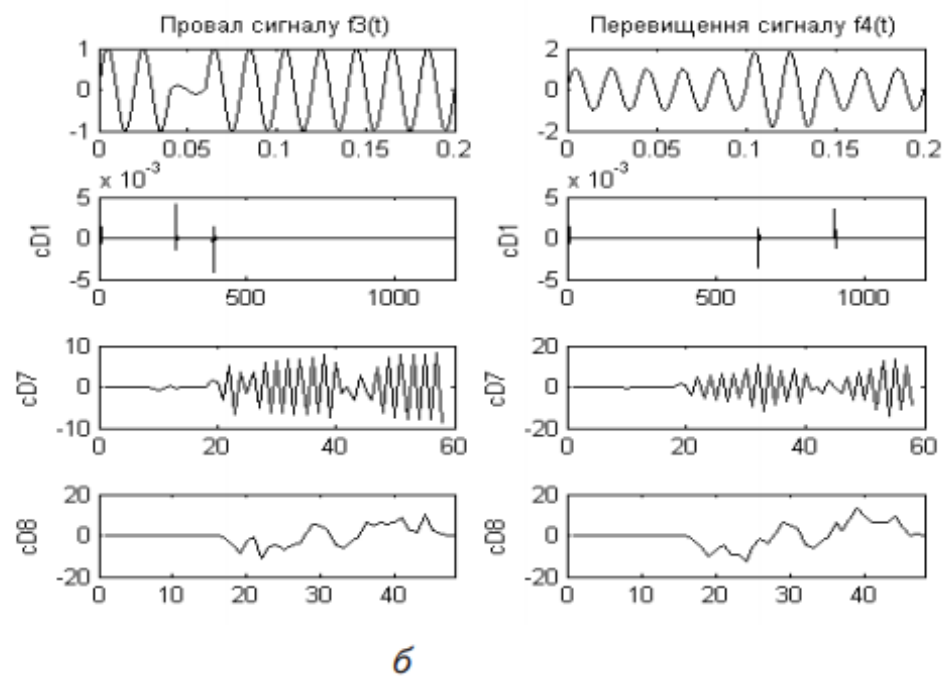
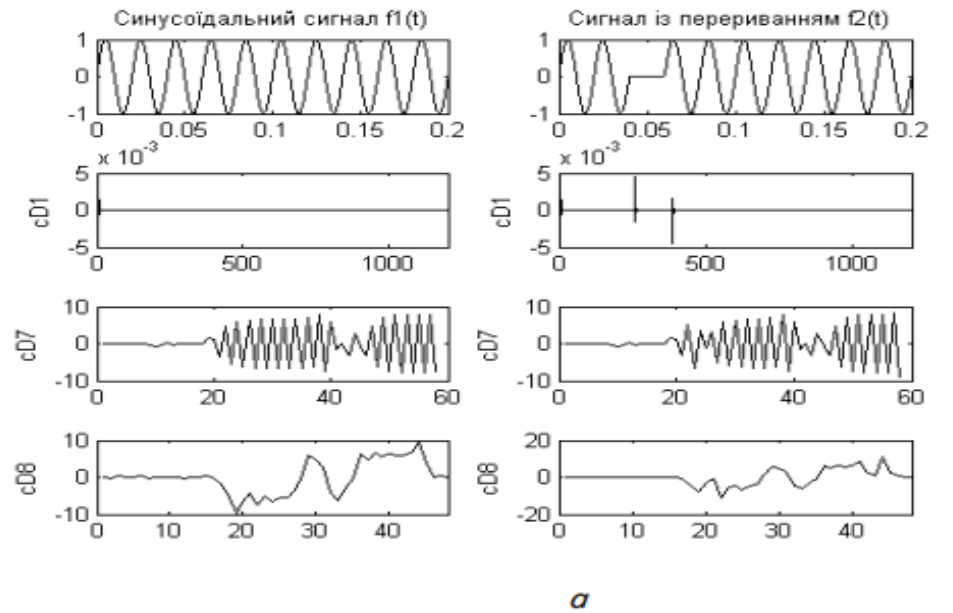
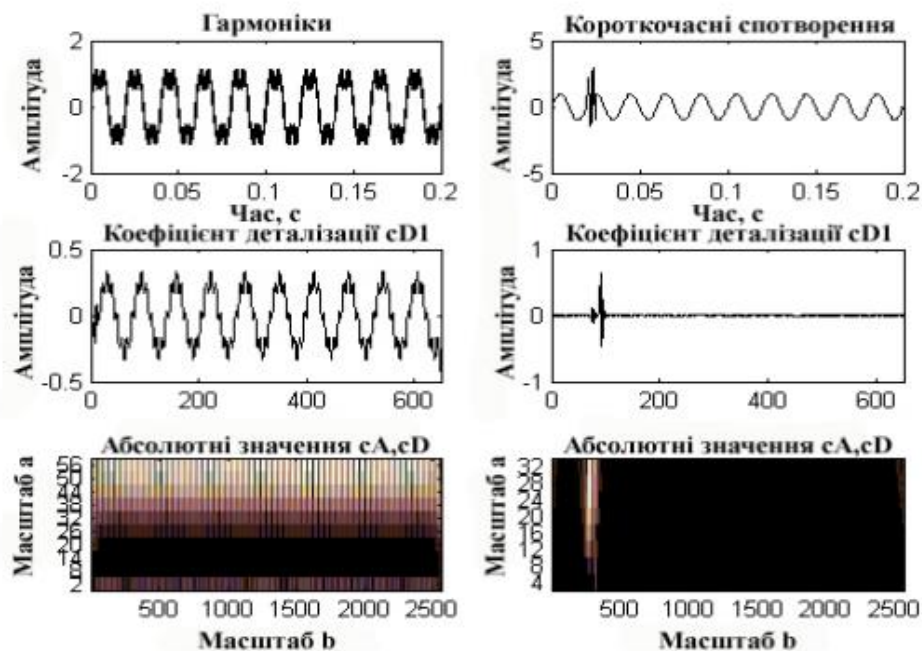
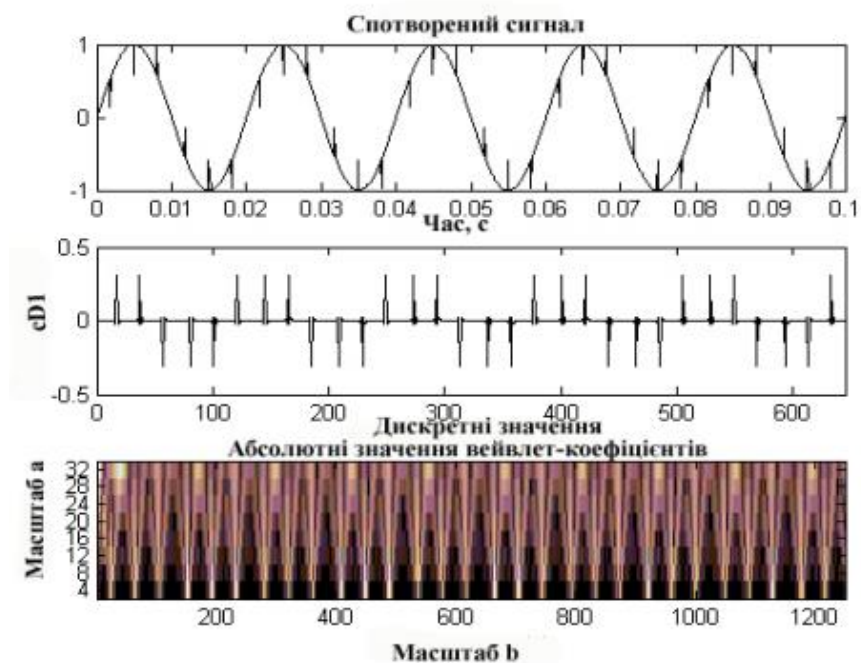


Рисунок 3.3 – Вейвлет-перетворення чистого синусоїдального сигналу та синусоїдального сигналу: а – із наявністю спотворення типу переривання амплітуди; б – із наявністю провалу напруги та перевищення номінального значення

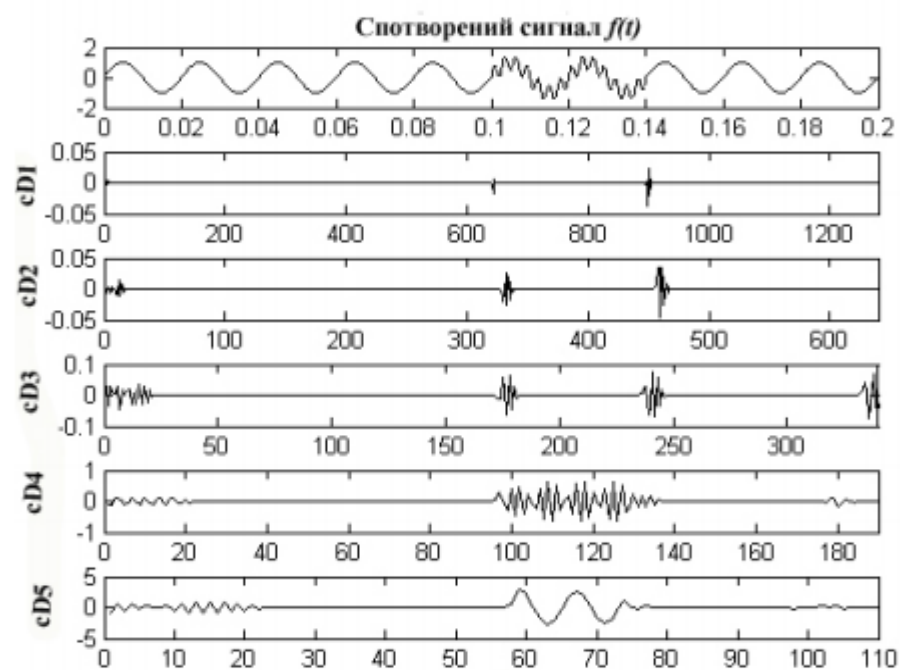


а

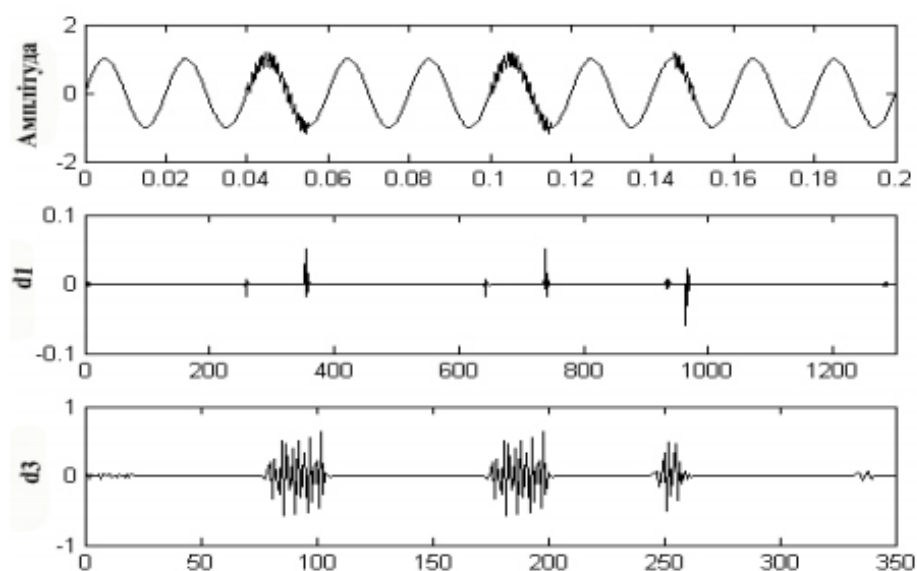


б

Рисунок 3.4 – Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу: а – із наявністю спотворення типу високочастотні гармоніки, короткочасні спотворення; б – із наявністю повторювальних високочастотних спотворень



а



б

Рисунок 3.5 – Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу: а – із наявністю третьої гармоніки на періоді 0.1 – 0.14 с; б – із наявністю коливальних високочастотних спотворень

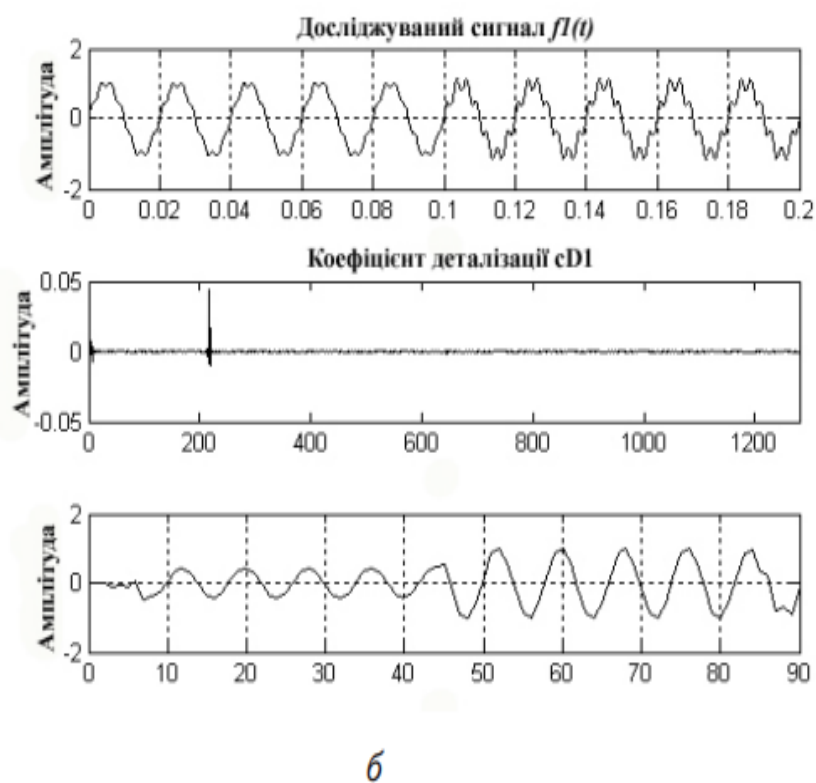
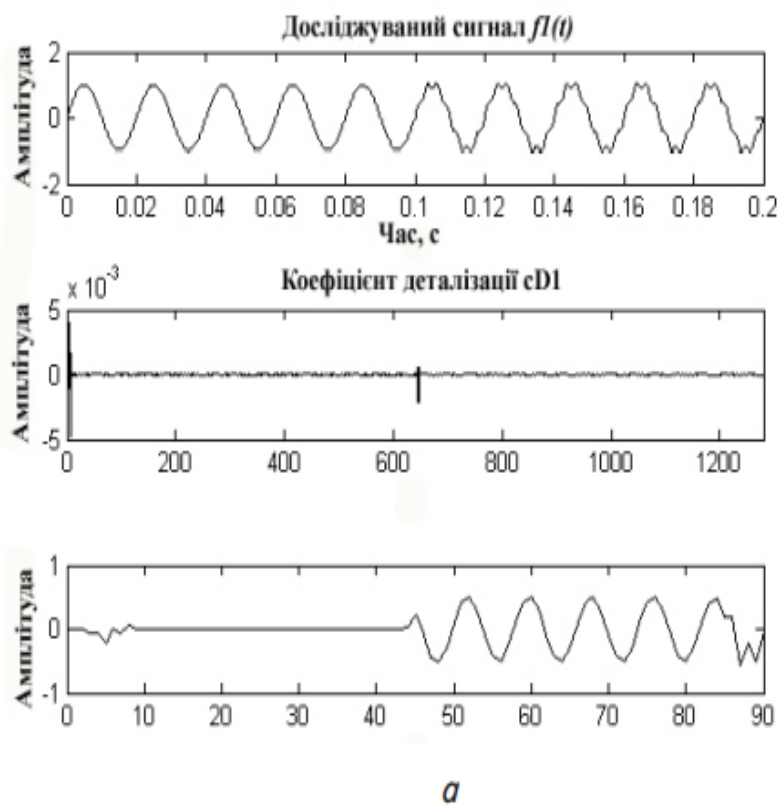


Рисунок 3.6 – Вейвлет-перетворення спотворених сигналів: а – наявність сьомої гармоніки із визначеного періоду; б – наявність гармоніки із періодичною зміною амплітуди

Як слідує із аналізу даних, наведених на рис. 3.3, синусоїдальний сигнал має нульове значення деталізуючого коефіцієнту  $cD1$ ; сигнали із наявністю спотворень (переривання, провал та перевищення напруги) мають ненульове значення коефіцієнту першого рівня вейвлет-перетворення.

Проаналізуємо також вплив інших спотворень на результати вейвлет-перетворення (рис. 3.4–3.6).

Як показує аналіз результатів, які наведені на рис. 3.4, у випадку наявності любого типу із наведених спотворень, наявність коефіцієнтів першого рівня вказує на їх наявність.

Аналіз результатів дослідження (рис. 3.5) свідчить, що значення деталізуючого коефіцієнту першого рівня вказує на наявність спотворення, його тривалість та, відповідно до частоти гармоніки – її наявність на визначеному рівні вейвлет-розкладання.

Аналіз отриманих результатів (рис. 3.4–3.6) показує, що подібно до результатів ортогонального перетворення (рис. 3.3), наявність любого типу спотворення у сигналі та його тривалість (початок – закінчення) однозначно ідентифікується наявністю деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції ( $cD1 > 0$ ). Тобто, даний коефіцієнт є узагальненим (для любых типів спотворень інформаційного сигналу) ідентифікатором їх наявності. Тобто, визначаючи тільки його наявність можливо проводити моніторинг якості електричної енергії у реальному часі незважаючи на те чи є інформаційний сигнал (напруга електричної мережі або струм) стаціонарним, чи ні.

### Висновки за розділом 3

Отже, було розглянуто моделі двох характерних видів сигналів:

1. Наявність стрибків першого роду;
2. Одночасна наявність у сигналі декількох гармонік (третьої та п'ятої).

Було розглянуто Фур'є-аналіз сигналів із наявністю:

а) розривів першого роду:

- досліджувальний сигнал;
- амплітудно-частотний спектр;
- фазо-частотний спектр;

б) третьої та п'ятої гармонік:

- досліджувальний сигнал тип 2;
- амплітудно-частотний спектр (основний сигнал, третя гармоніка, п'ята гармоніка);
- фазо-частотний спектр;

Також було проведено вейвлет-аналіз для сигналів із наявністю:

а) розривів першого роду:

- досліджувальний сигнал  $f(t)$ ;
- $cD1 - cD4$  (деталізуючі коефіцієнти вейвлет-перетворення першого-четвертого рівня:  $j$ =від 1 до 4, кожний окремо);

б) третьої та п'ятої гармонік:

- досліджувальний сигнал тип 2;
- $cD5 - cD6$  (деталізуючі коефіцієнти вейвлет перетворення п'ятого та шостого рівня:  $j=5$  та  $j=6$ ).

Було проаналізовано вплив наявності спотворень в інформаційному сигналі на результати його ортогонального перетворення.

Було розглянуто вейвлет-перетворення чистого синусоїдального сигналу та синусоїдального сигналу:

а) із наявністю спотворення типу переривання амплітуди:

- провал сигналу  $f_3(t)$ ;
- $cD1, cD7, cD8$  – коефіцієнти вейвлет перетворення;

б) із наявністю провалу напруги та перевищення номінального значення:

- перевищення сигналу  $f_4(t)$ ;
- $cD1, cD7, cD8$  – коефіцієнти вейвлет перетворення.

Було розглянуто вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу:

а) із наявністю спотворення типу високочастотні гармоніки, короткочасні спотворення:

- гармоніки;
- коефіцієнт деталізації  $cD1$  (з амплітудою від -0.5 до 0.5);
- абсолютні значення  $cA, cD$ ;
- короткочасні спотворення;
- коефіцієнт деталізації  $cD1$  (з амплітудою від -1 до 1);

б) із наявністю повторювальних високочастотних спотворень:

- спотворений сигнал;
- $cD1$  – деталізуючий коефіцієнт вейвлет-перетворення;
- абсолютні значення вейвлет коефіцієнтів;

Було розглянуто вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу:

а) із наявністю третьої гармоніки на періоді 0.1-0.14 с:

- спотворений сигнал  $f(t)$ ;
- $cD1 - cD5$  (деталізуючий коефіцієнт вейвлет-перетворення);

б) із наявністю коливальних високочастотних спотворень:

- амплітуда вимірювального сигналу;
- $d1$  та  $d3$  – коефіцієнти вейвлет-перетворення.

На завершальному етапі даного розділу було розглянуто вейвлет-перетворення спотворених сигналів:

а) наявність сьомої гармоніки із визначеного періоду:

- досліджувальний сигнал  $f(t)$ ;
- коефіцієнт деталізації  $cD1$ ;



б) наявність гармоніки із періодичною зміною амплітуди:

- досліджувальний сигнал;
- коефіцієнт деталізації  $cD1$ .

Таким чином, аналіз отриманих результатів показує, що подібно до результатів ортогонального перетворення, що наявність любого типу спотворення у сигналі та його тривалість (початок – закінчення) однозначно ідентифікується наявністю деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції ( $cD1 > 0$ ).

## РОЗДІЛ 4

### СТАРТАП-ПРОЕКТ

#### 4.1 Опис ідеї проекту

Головною ідеєю даного проекту є: регулювання напруги та активної потужності за допомогою гнучкої системи FACTS.

Баланс активних потужностей у мережі визначає рівень частоти. За допомогою систем управління забезпечується баланс активних потужностей при частоті 50 Гц. Якщо баланс потужностей порушується, то змінюється і частота у мережі. Причиною порушення балансу може бути аварійне відключення генераторів на електростанціях, будь якого елементу електричної системи, включення і відключення споживачів. Розподіл потужностей при зміні частоти відрізняється від оптимального, що викликає зростання втрат потужностей та зменшення терміну роботи обладнання із-за перегрівів ізоляції.

Заходи щодо зниження коливань напруги:

1. Пристрої повздовжньої компенсації;
2. Синхронні генератори с АРЗ;
3. Роздільне живлення навантажень (статичної і різкозмінної).

Основна ідея використання пристроїв FACTS базується на добре відомих принципах повздовжньої та поперечної компенсації реактивних параметрів передачі електроенергії, а отже і складових реактивної потужності. Застосування ж швидкодіючих напівпровідникових ключів і мікропроцесорних систем керування дозволило перейти від повільного і дискретного оперативного керування до плавного автоматичного регулювання реактивних параметрів передачі (напрямків енергопотоків з різною інтенсивністю) зі швидкодією, яка достатня для керування режимами при протіканні перехідних процесів в енергосистемах [24].

Напрямки впливу інтелектуальних технологій на функціонування і загальний стан роботи сучасної мережі [25]:

- поінформованість у режимі реального часу та ситуаційний аналіз системи розподілу допоможуть удосконалено керувати системою, що, у свою чергу, підвищить надійність;

- визначення місць пошкоджень ізоляції та прискорення відновлення роботи мережі, коли трапляються перебої, дозволяючи працюючим бригадам різко звужити поле пошуку пошкоджених ліній;

- автоматизація підстанцій дозволяє пристроям планування, моніторингу та керування обладнанням у децентралізованій формі, що дозволяє більш ефективно використовувати бюджет та підвищує надійність;

- SCADA/DMS (Системи керування розподілом) дають більш глибокий аналіз і контрольні функції в руки операторів мережі;

- керування напругою за допомогою компенсації реактивної потужності та більш широкого застосування пристроїв силової електроніки, збільшення пропускної спроможності існуючих ліній і покращення відмовостійкості системи в цілому.

#### **4.2 Застосування гнучкої системи передачі змінного струму для можливості регулювання напругою та активною потужністю (фазового кута напруги) з метою корегування спотворень якості електричної енергії в сучасних електроенергетичних системах**

Запровадження запозиченої термінології з закордону набула назву в Україні FACTS. Гнучкі системи передачі змінного струму – системи, що базуються на силовій електроніці та статичному обладнанні і забезпечують керування одним чи декількома параметрами систем змінного струму.

Задачі даної системи.

1. Підвищення пропускної спроможності ліній електропередачі, аж до теплової межі до нагріву;

2. Забезпечення сталої роботи енергосистеми при різних збуреннях;
3. Забезпечення заданого (примусового розподілу) потужності в електричних мережах відповідно до вимог диспетчера;
4. Регулювання напруги в мережах.

Вирішення даних задач.

1. Комплексне і оптимальне рішення цих проблем здійснюється при застосуванні технології керованих систем передачі змінного струму (FACTS);

2. FACTS – це електропередачі змінного струму, оснащені пристроями сучасної силової електроніки;

3. FACTS перетворює функцію електричної мережі з існуючої «пасивної» в «активну».

Пристрої FACTS на базі перетворювачів

Варто відзначити, що серед пристроїв на базі перетворювачів є два основних типи перетворювачів, це перетворювачі напруги і перетворювачі струму. Перший видається більш вигідним з загальної точки зору і, отже, стане основою для представлення всього класу перетворювачів на базі пристроїв FACTS. Пристрої FACTS розділяються на три основні групи: поздовжньої компенсації; паралельної компенсації; комбіновані пристрої.

Пристрої поздовжньої компенсації – це пристрої змінного опору (конденсатори, реактори і т.ін.) або пристрої силової електроніки на джерелах напруги змінного струму (рис 4.1).

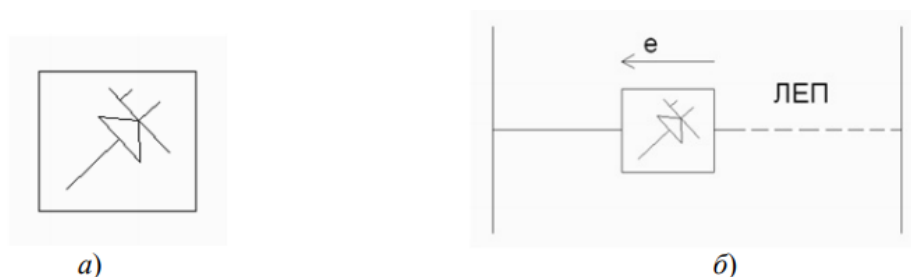


Рисунок 4.1 – Умовні позначення: а) пристроїв FACTS; б) схеми підключення пристроїв поздовжньої компенсації

Згідно з даними IEEE відомі наступні пристрої цього класу:

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator) – статичний синхронний поздовжній компенсатор;
- IPFC (Interline Power Flow Controller) – контролер потоків потужності між лініями електропередач;
- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) — тиристорно-керований поздовжній конденсатор.

TCSC є найбільш поширеним пристроєм повздовжньої компенсації. Він являє собою ємнісний компенсатор, який включає поздовжню батарею конденсаторів, що шунтуються тиристорно-керованим реактором з метою плавного регулювання реактивного опору.

Пристрої поздовжньої компенсації передбачають реалізацію наступних функцій:

- збільшення пропускної спроможності ЛЕП;
- зменшення втрат активної потужності за рахунок зміни потекорозподілу паралельних ділянок у мережі;
- зменшення вартості передачі електроенергії, оскільки використання пристроїв поздовжньої компенсації є альтернативою побудові нових ЛЕП і встановлення додаткових пристроїв поперечної компенсації;

- збільшення межі перехідної стійкості, а також поліпшення динамічної стійкості.

Рівень компенсації повинен бути максимальним (ємнісним), коли генератор прискорюється – для забезпечення максимуму переданої електроенергії, і мінімальним (індуктивним) при гальмуванні генератора – забезпечення мінімального значення переданої електроенергії.

Пристрої паралельної компенсації – це пристрої змінного опору (конденсатори, реактори і т.д.), або змінне джерело, яке генерує струм в систему в точці загального підключення (рис. 4.2).

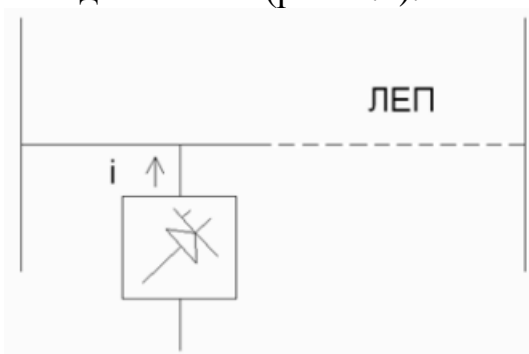


Рисунок 4.2 – Умовне позначення схеми підключення пристроїв паралельної компенсації

Найбільш поширені пристрої цього класу – це статичний компенсатор реактивної потужності (SVC – англ. Static Var Compensator) та статичний синхронний компенсатор STATCOM (STATCOM – англ. Static Synchronous Compensator).

SVC – це поперечно приєднаний статичний генератор чи споживач реактивної потужності, який налаштований для генерування ємнісного або індуктивного струму так, щоб підтримувати або керувати заданими параметрами електричної системи, наприклад напругою на шинах. До

сімейства SVC належать тиристорно-керований реактор (TCR) та тиристорно-комутований конденсатор (TSC).

Відповідно до визначень IEEE:

- TCR – це поперечно приєднана тиристорно-керована індуктивність, реактанс якої плавно змінюється за рахунок керування провідністю тиристорного вентиля.

- TSC – це поперечно приєднаний тиристорно-комутований конденсатор, реактанс якого змінюється дискретно за рахунок роботи тиристорного вентиля в режимі повної або нульової провідності.

Загальні риси пристроїв SVC наступні:

- відсутність рухомих (обертових) механічних елементів;
- використання звичайних індуктивних та ємнісних елементів;
- функції керування виконуються за допомогою силової електроніки. В конструкції SVC використовуються такі основні елементи регулювання:

- реактор з тиристорним управлінням (TCR);
- конденсатор з тиристорною комутацією (TSC);
- реактор з тиристорною комутацією (TSR);
- конденсатор з механічною комутацією (MSC).

Конденсатор з механічною комутацією (MSC) є пристроєм, що включає конденсаторну батарею і комутатор. Він розрахований на комутацію не більше декількох разів на день, оскільки його комутація здійснюється відповідними вимикачами. Призначенням MSC є забезпечення реактивною потужністю в періоди зростання реактивного навантаження.

Регульована компенсація реактивної потужності досягається використанням конфігурацій вище наведених пристроїв (TCR, TSC, TSR, MSC).

STATCOM – це статичний синхронний генератор, що працює як статичний компенсатор SVC (рис.4.3), вихідний ємнісний або індуктивний струм якого є керованим незалежно від змінної напруги електричної системи. Він в основному складається з понижувального трансформатора, реактивних опорів, трифазних запираних тиристорів (GTO) чи інвертора напруги (VSC), заснованого на багатоімпульсних біполярних транзисторах (IGBT), і конденсатора постійного струму.

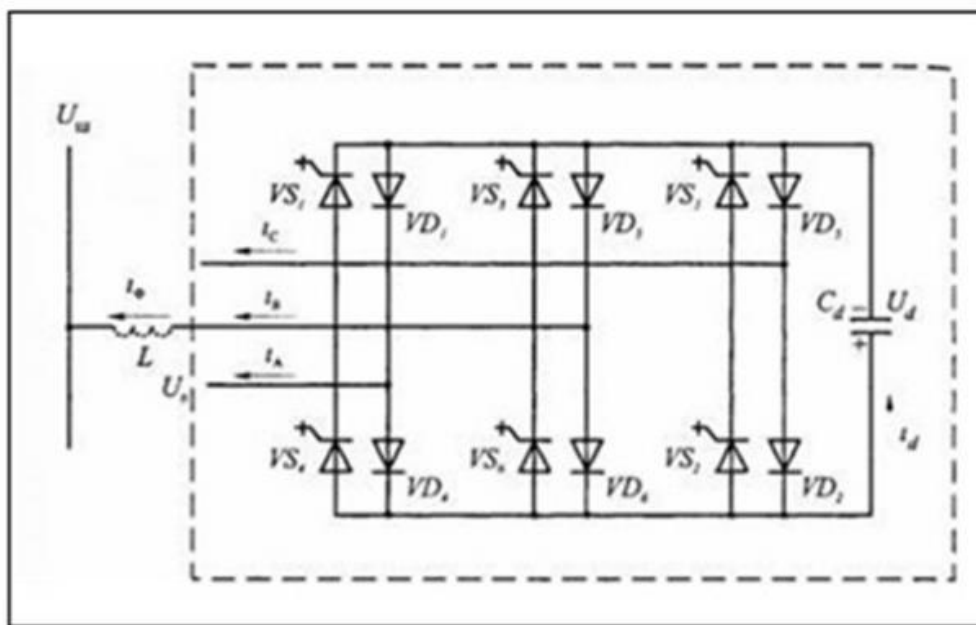


Рисунок 4.3 – Схема STATCOM з інвертором напруги

VSC є складовим блоком STATCOM і його задача полягає у перетворенні синусоїдальної напруги змінного струму з мінімальними гармонічними складовими.

STATCOM може працювати у двох режимах:

- у режимі регулювання напруги;



- у режимі компенсації реактивної потужності.

Типове застосування STATCOMa є:

- ефективне регулювання та керування напруги;
- скорочення тимчасової перенапруги;
- покращення потенціалу передачі потужності;
- покращення межі перехідної стійкості;
- демпферування коливань в енергосистемі.

Наведені можливості поперечних компенсаторів для контролю переданої потужності можуть бути використані для збільшення меж перехідної стійкості, а також покращення динамічної стійкості.

STATCOM сьогодні можна розглядати як найбільш досконалий та багатофункціональний статичний пристрій FACTS, оскільки він може керувати як модулем, так і фазовим кутом вектора напруги, хоча він є досить дорогим. Однак за минулі десять років XXI століття за кордоном ціла низка пристроїв STATCOM вже реалізована. Зазначимо, що використання двох пристроїв STATCOM, включених за спеціальною схемою, дозволяє не тільки регулювати напругу, але й збільшити пропускну здатність мереж, оптимізувати потоки потужності, покращити форму кривої напруги, забезпечувати об'єднання енергосистем, працюючих несинхронно.

Комбіновані пристрої включають в себе пристрої поздовжньої та паралельної компенсації зі змінними джерелами (UPFC) (рис. 4.4). У цьому класі пристроїв струм генерується в систему з паралельної частини, а напруга з поздовжньої. Оскільки обидві частини об'єднані, може бути обмін активною потужністю між частинами через силову ланку. Серед комбінованих пристроїв також розглядають поздовжньо-поздовжні і поздовжньо-поздовжньо-паралельні змінні джерела, які пов'язані з багатолінійною системою передачі (IPFC). У цих конфігураціях можливе збалансування потоків як активної, так і реактивної потужності в лініях.

До даного класу відносять наступні пристрої :

- TCPST (Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer) – тиристорно-керований фазорегулювальний трансформатор;
- IPC (Interphase Power Contoller) – регулятор потужності між фазами;
- UPFC (Unified Power Flow Controller) – об'єднаний регулятор потоків потужності.

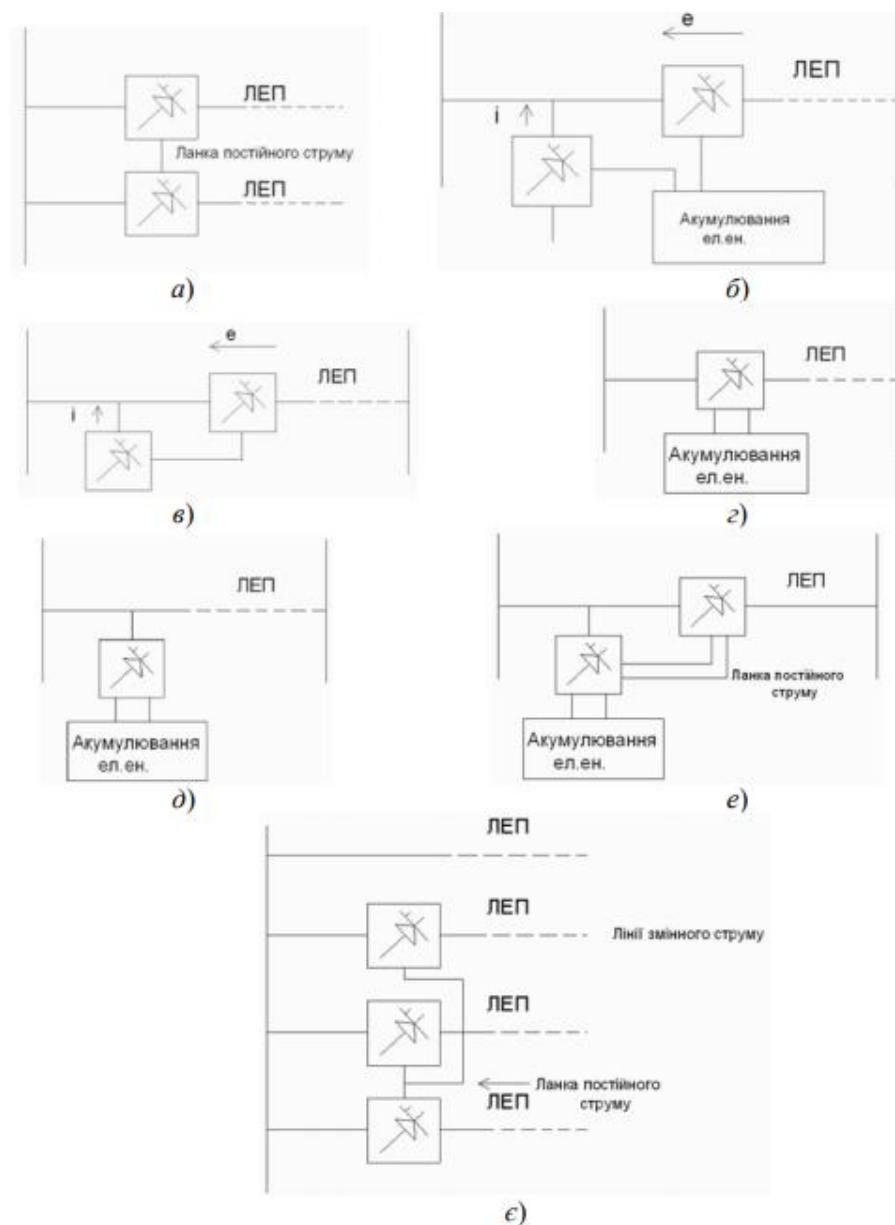


Рисунок 4.4 – Умовне позначення схеми підключення комбінованих пристроїв

UPFC є найбільш відомим. Він є одним з найрізноманітніших пристроїв сімейства FACTS, що використовує прилади силової електроніки для керування всіма параметрами, які впливають на потік потужності в лінії передачі [26, 27]. UPFC використовує поєднання поперечного контролера (STATCOM) і поздовжніх контролерів (SSSC) між собою через загальну шину постійного струму, як показано на рис. 4а. Така топологія FACTS забезпечує набагато більшу гнучкість керування за активною та реактивною потужністю лінії ніж SSSC, оскільки активна потужність тепер може бути передана з поперечного перетворювача у поздовжній перетворювач через шину постійного струму.

Еквівалентна схема UPFC, що наведена на рис. 4.5, складається з паралельно підключеного джерела напруги, послідовно з'єднаних джерел напруги та обмежувача активної потужності, яка з'єднує два джерела напруги. Два джерела напруги підключені до системи змінного струму через трансформатори перетворювачів напруги VSC.

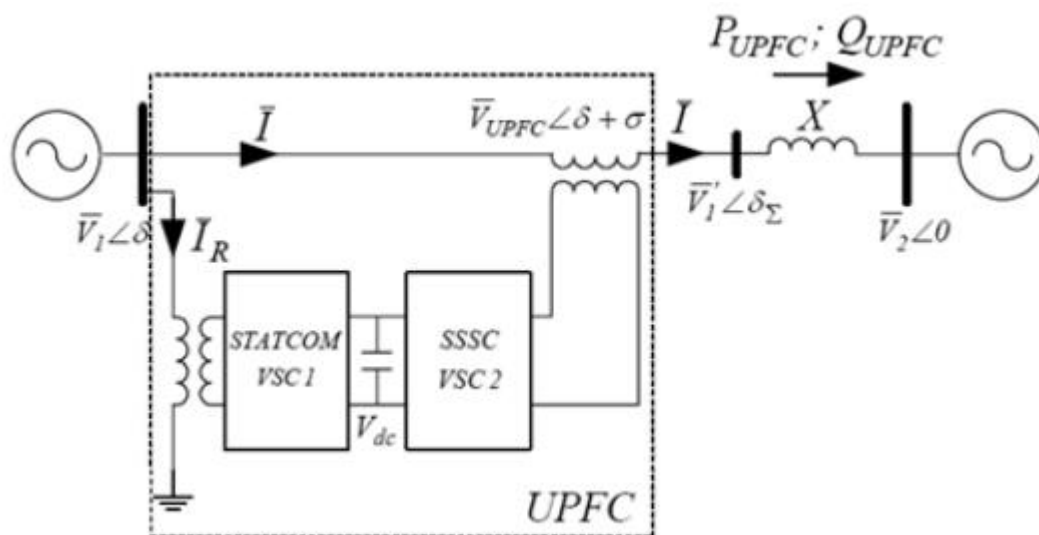


Рисунок 4.5 – Еквівалентна схема UPFC

Можливості UPFC керування переданої потужності можуть бути використані для збільшення межі перехідної стійкості, а також покращення динамічної стійкості системи.

Комбіновані пристрої компенсації можуть бути використані для демпферування коливань потужності.

В таблиці 4.1 показано приклади технологій FACTS для коригування спотворень в мережах Smart Grid

Таблиця 4.1 – Приклади технологій FACTS для коригування спотворень в мережах Smart Grid

№	Пристрої FACTS	Предмет управління
1	Статичний компенсатор реактивної потужності (SVC) (TCR, TCS, TRS)	Керування та регулювання напруги, усунення коливань
2	Керований тиристорами поздовжній компенсатор Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC, TSSC)	Керування струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
3	Керований тиристорами поздовжній реактор Thyristor Controlled Reactor Series (TCSR, TSSR)	Керування струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
4	Керований тиристорами фазний перетворювач Thyristor Controlled Phase Transformer (TCPST, TCPR)	Перехід до керування активної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
5	Керований тиристорами регулятор напруги Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR)	Керування реактивною потужністю, регулювання напруги, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
6	Керований тиристорами обмежувач напруги Thyristor Controlled Voltage Limited (TCVL)	Тимчасове і динамічне обмеження напруги
7	Синхронний статичний компенсатор Synchronous Static Compensator без акумулювання електричної енергії (STATCOM Without storage)	Керування напругою, усунення коливань, стійкість за напругою, компенсація реактивної потужності
8	Синхронний статичний компенсатор з акумулюванням електричної енергії Synchronous Static Compensator (STATCOM With storage)	Керування напругою та забезпечення стійкості, компенсація реактивної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
9	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення без акумулювання електричної енергії Static Synchronous Series Compensator (SSSC Without storage)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
10	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення з акумулюванням електричної енергії Static Synchronous Series Compensator (SSSC With storage)	Керування струмом, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
11	Об'єднаний регулятор потоків потужності Unified Power Flow Controller (UPFC)	Керування активною та реактивною потужностями, регулювання напруги, компенсація реактивної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
12	Керування розподілом навантаження між лініями Interline Power Flow Controller (IPFC) or Back to Back (BtB)	Керування реактивною потужністю, регулювання напруги, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою

### 4.3 Технологічний аудит проекту

Ідея проекту полягає в тому, щоб за допомогою технологій FACTS можна було регулювати напругу в ЛЕП (лінії електропередачі) для коригування спотворень, які виникають у цій лінії.

Таблицю 4.2 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування технологій FACTS для регулювання напругою з метою коригування спотворень, які виникають в мережах Smart Grid	Керування заданими параметрами електричної системи (наприклад, напругою на шинах)	Налаштування системи до відповідних параметрів електричної системи, що зменшать ризики появи спотворень
	Керування провідністю теристорного вентиля	Налаштування необхідної провідності в системі
	STATCOM за допомогою якого здійснюється керування вихідним ємнісним або індуктивним струмом	Можливість керування ємнісним та індуктивним струмом незалежно від змінної напруги електричної мережі, а також демферування коливань в енергосистемі
	Керування всіма параметрами, які впливають на потік потужності в лінії передачі	Можливість використання для збільшення межі перехідної стійкості

Розглянемо наступну таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент			
Собівартість реалізації	Низька собівартість	Висока собівартість пристроїв			+
Пошук потенційних клієнтів	Залежить від покупця	Залежить від виробника		+	
Отримання інформації про об'єкт	Від держави	Від покупця технологій	+		
Формат нагляду стосовно місцеположення	Віддалений нагляд	На місці виробництва			+
Достовірність інформації	Повна достовірність та точність даних	Повна достовірність без точності даних			+

Отже, з таблиці порівняння пристроїв FACTS видно, що технології проекту мають переваги над технологіями конкурента, коригування спотворень пристроями FACTS забезпечить: керування та регулювання напруги, усунення коливань, динамічну стійкість та стійкість за напругою, перехід до керування активної потужності.

Таблиця 4.4 – Переваги та недоліки проекту

Переваги	Недоліки
Досконалість та багатофункціональність пристроїв	Вартість пристроїв
Підвищення пропускної здатності до теплової межі нагрівання проводів	Застосування великої кількості додаткового «розумного» обладнання (приладів управління, контролю, збору, збереження, обробки, передачі даних та ін.)
Покращення якості електричної енергії	Втрати електричної енергії у випадку генерації її за допомогою використання відновлювальних джерел енергії через необхідність здійснення різних перетворень енергії
Оптимізація потоків потужності	Нестабільність у роботі всієї енергосистеми через несприятливі погодні умови

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В таблиці 4.5 проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку

Таблиця 4.5 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	1
2	Динаміка ринку	Зростає
3	Наявність обмежень на ринку	Відсутні
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не потребує стандартизації та сертифікації

Ринок є привабливим так, як кількість конкуруючих проектів не значна до яких входить даний проект, попит на продукцію зростає. Зростання попиту пояснюється тим, що електричні установки дозволять швидше та вигідніше з економічної точки зору забезпечити додаткову потужність мережі у порівнянні з додатковим будівництвом ЛЕП. Це забезпечить регулювання напруги та потужності в реальному часі більш надійне та безпребійне та коригування спотворень, які виникають в Smart Grid.

В таблиці 4.6 визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики та орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.



Таблиця 4.6 – Характеристики потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Застосування технологій FACTS для регулювання напругою з метою коригування спотворень, які виникають в мережах Smart Grid	Наукова, дослідницька діяльність. Керування та регулювання.	При використанні в науковій чи дослідницькій діяльності потребує перевірки: моніторинг та аналіз інформації	Моніторинг в реальному часі
		При застосуванні в системі енергетичного менеджменту необхідна перевірка невідповідностей: корекції, коригувальні та запобіжні дії	Достовірність інформації
			Швидкодія перевірки невідповідностей
			Ідентифікація спотворень

Проведення аналізу ринкового середовища (факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають) наведено в таблицях 4.7 та 4.8.

Таблиця 4.7 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
Умови конкуренції	Впровадження державою систем коригування спотворень відмінних від запропонованих	Зниження попиту до пристроїв гнучкої системи FACTS
Необхідний рівень кваліфікації персоналу	Некваліфікований персонал, що призведе до небажаного виходу з ладу пристроїв в процесі їхньої експлуатації	Недосягнення організаційної мети поставленої до початку проекту, немотивований персонал

Таблиця 4.8 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
Структура ринку та його потенційна ємність	Аналіз рівня своїх витрат на виробництво і збут товарів	Зацікавленість до продукції
Вимоги до продукції	Якість та належне функціонування в процесі експлуатації технологій	Зростання попиту на певний вид продукції

З аналізу факторів можливостей та загроз робимо наступний висновок, зміна законодавчої влади може негативно вплинути на попит технологій FACTS; некваліфікований персонал призведе до недосягнення організаційної мети поставленої до початку проекту. Можливості – встановлення ціни такої, як в конкурентів, чи нижчої надасть змогу аналізувати рівень своїх витрат на

виробництво і збут товарів. Встановивши чіткі вимоги до продукції та контроль за функціонуванням в процесі експлуатації технологій збільшить попит на певний вид продукції.

Таблиця 4.9 – SWOT-аналіз впровадження проекту

Strengths (сильні сторони)	Weaknesses (слабкі сторони)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- проект немає рівносильних аналогів;</li> <li>- моніторинг та самовідновлення, що продовжать термін експлуатації обладнання;</li> <li>- віддалений моніторинг обладнання;</li> <li>- автоматичне регулювання реактивних параметрів передачі зі швидкодією</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- рівень ринкових цін;</li> <li>- державна система контролю за ціноутворенням</li> </ul>
Opportunities (можливості)	Threats (загрози)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- зростання попиту на технології FACTS;</li> <li>- керування технологіями в реальному часі;</li> <li>- кібербезпека</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- впровадження нових технологій;</li> <li>- несприятливі кліматичні умови;</li> <li>- затрати на обслуговування та ремонт</li> </ul>

#### 4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів представлено в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Науковці	Часткова готовність	Високий	Слабка	Просто
Інвестори	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Журналісти	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
Держенергопостачання	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Які цільові групи вибрано: Інвестори та Держенергопостачання				

Вибрано 2 цільові групи тому використовую стратегію диференційованого маркетингу. Диференційований маркетинг – це вид маркетингу, що розробляє різні маркетингові комплекси для різних споживачів сегментів (в нашому випадку для інвесторів та держенергопостачання), виходячи з їх відмінностей та особливостей потреб, що були покладені в основу сегментування ринку.

Щоб диференційований маркетинг був привабливий для компанії, потрібно дотримуватися наступних умов:

- для кожного сегмента розробляти окремий продукт і комплекс маркетингових заходів;
- пропозиція одного і того ж товару різним сегментам з адаптованим комплексом маркетинг-мікс;

- реклама різних моделей продукції;
- компанія повинна зіставляти додаткові витрати й додаткові доходи від реалізації продукції на різних сегментах ринку;
- бути непривабливою для конкурентів.

Головне завдання, яке постає перед компаніями, які обирають стратегію диференційований маркетингу – це правильно обрати ступінь однорідності продукції, врахування маркетингових стратегій конкурентів, також доцільно врахувати сильні сторони компанії, розмір ринків, стосунки з посередниками; найвигідніший сегмент повинен мати високий рівень поточного збуту, високі темпи зростання, високу норму прибутку, слабку конкуренцію.

#### 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Концепція маркетингової комунікації показана в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Концепція маркетингової комунікації

Цільові групи	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Інвестори	Система збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, достовірність, повнота інформації	Спонукати до купівлі даного товару певного споживача (покупця).	Представлення вигід цієї пропозиції, надання особливої цінності продукту, підкреслення переваг продукту
Держенергопостачання	Система збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, достовірність, повнота інформації		

#### **Висновки за розділом 4**

Отже, така гнучка система передачі змінного струму FACTS на даний час немає рівносильних конкурентів на ринку збуту технологій, які використовує ця система. Попит на цю систему наявний серед інвесторів та держенергопостачання. Проект є рентабельним. Бар'єром до впровадження проекту є складність в рекламуванні даного продукту. Стан конкуренції проекту має переваги у контролі за коригуванням спотворень, які виникають в електромережі. За допомогою електронних контролерів здійснюється керування потоками навантаження і, завдяки своїй швидкій керованості, гасіння коливань потужності або запобігання субсинхронному резонансу. Тільки забезпечує коригування спотворень, а не ідентифікує їхній тип. Доцільно обрати для ринкової реалізації проекту диференційований маркетинг, що забезпечує для кожного сегмента розроблення окремого продукту і комплекс маркетингових заходів. Подальша імплементація даного проекту є вигідною з точки зору структури ринку та потенційної ємності, а також вимог до продукції.

## ВИСНОВКИ

1. Якість електричної енергії – це відповідність основних показників встановленим нормам при виробництві, передачі і розподілу електричної енергії загального призначення. До основних причин, що знижують якість електричної енергії відносять:

- 1) зміна структури енергоносіїв;
- 2) збільшення числа могутніх приймачів електричної енергії;
- 3) дія нелінійних навантажень;
- 4) посилення взаємного впливу різних видів електрообладнання.

2. Для кожного вимірювального показника ЯЕЕ існує три класи характеристик процесу вимірювання А, S і В (далі - класи А, S, В). Для кожного класу визначені методи вимірювань і відповідні вимоги до характеристик ЗВ.

3. Вейвлет-перетворення – інтегральне перетворення, яке є згортокою вейвлет-функції з сигналом. Вейвлет-перетворення перетворює сигнал з часового простору в частотно-часовий. Спосіб перетворення функції (чи сигналу) у форму, яка робить деякі величини початкового сигналу такими, що більше піддаються вивченню, або дозволяє стиснути початковий набір даних. Вейвлет-перетворення сигналів є узагальненням спектрального аналізу.

4. Для перевірки адекватності теоретичного рішення та його практичну значимість було проведено порівняльний аналіз результатів обробки сигналів за допомогою Фур'є та вейвлет-аналізу. Було розглянуто моделі двох характерних видів сигналів. Перший – це наявність стрибків першого роду. Другий – одночасна наявність у сигналі декількох гармонік – третьої та п'ятої.

5. Головною ідеєю стартап-проекту є: регулювання напруги та активної потужності за допомогою гнучкої системи FACTS.

Отже, серед пристроїв на базі перетворювачів є два основних типи перетворювачів, це перетворювачі напруги і перетворювачі струму. Перший видається більш вигідним з загальної точки зору і, отже, стане основою для представлення всього класу перетворювачів на базі пристроїв FACTS. Пристрої FACTS розділяються на три основні групи: поздовжньої компенсації; паралельної компенсації; комбіновані пристрої.

6. Технології проекту мають переваги над технологіями конкурента, коригування спотворень пристроями FACTS забезпечить: керування та регулювання напруги, усунення коливань, динамічну стійкість та стійкість за напругою, перехід до керування активної потужності.

7. Цільові групи потенційних споживачів: інвестори та держенергопостачання. Було обрано стратегію диференційованого маркетингу. Головне завдання, яке постає перед компаніями, які обирають стратегію диференційований маркетингу – це правильно обрати ступінь однорідності продукції, врахування маркетингових стратегій конкурентів, також доцільно врахувати сильні сторони компанії, розмір ринків, стосунки з посередниками; найвигідніший сегмент повинен мати високий рівень поточного збуту, високі темпи зростання, високу норму прибутку, слабку конкуренцію.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) Электромагнітна сумісність (ЕМС) [Текст] / Частина 4-30. Методи випробувань та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. – 59 с.
3. Куско, А. Качество электрической энергии [Текст] / А. Куско, М. Томпсон. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
4. Dash, P. Frequency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filter [Text] / P. Dash, A. Pradham, G. Pauda // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 3. – P. 230–238.
5. Залмазон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залмазон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. – 496 с.
6. Волошко, А. В. Устранение влияния неустойчивости частоты сети на точность определения качества электрической энергии [Текст] / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Техническая электродинамика. – 1994. – № 4. – С. 73–77.
7. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
8. Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. [Текст] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
9. Andria, G. A Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy [Text] / G. Andria, H. Savino, A. Trotta //

Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1989. – Vol. 38, № 4. – P. 856–863.

10. Волошко, А. В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа [Текст] / А. В. Волошко // Техническая электродинамика. – 1991. – № 3. – С. 8–13.

11. Abdel-Galil, T. Power quality disturbance classification using the inductive inference approach [Text] / T. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssed // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1812–1818.

12. He, H. A self-organizing learning array system for power Quality classification based on wavelet transform [Text] / H. He, J. A. Starzyk // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 286–295.

13. Ribeiro, R. Wavelet Transform: An Advanced Tool for Analysing non Stationary Harmonic Distortion in Power Systems [Text] : Proc. Of IEEE intern. conf. / R. Ribeiro // Harmonic in Power Systems, 1994. – P. 452–457.

14. Zwe-Lee, Gaing Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification [Text] / Gaing Zwe-Lee // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1560–1567.

15. Emmanouil, S. Expert system for classification and analysis of Power system event's [Text] / S. Emmanouil. M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu //IEEE Trans. On Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 423–428.

16. . Bizjak, B. Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic [Text] / B. Bizjak, P. Planinsic // Power Electronics and Motion Control Conference. – 2006. EPE-PENC 12 th Int., 2006. – P. 1356–1360.

17. Axelberg, P. Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances [Text] / P. Axelberg, I. Y.-H. Gu, M. H. Bollen // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, № 3. – P. 1297–1303.

18. Janic, P. Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network [Text] / P. Janic // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 3. – P. 1663–1669.

19. Grouse, M. S. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models [Text] / M. S. Grouse, R. D. Nowak, R. G. Baraniuk // IEEE Trans. Signal Processing. – 1998. – Vol. 46, № 4. – P. 886–902.

20. Dash, P. K. Classification of Power Disturbances using a Fuzzy expert system and a Fourier linear combiner [Text] / P. K. Dash, K. S. Mishra, M. M. A. Salama // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, № 2. – P. 472–477.

21. Введение в вейвлет-преобразование Robi Polikar, The Wavelet Tutorial, 2006. 59 с.

22. Волошко, А.В. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання [Текст] / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – С.13 – 14.

23. Mallat, S. A. A Theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [Text] / S. A. Mallat // IEEE Trans. Pattern Ana. Machine Intell. – 1989. – Vol. 11. – P. 674–693.

24. С.П.Денисюк, Д.Г. Дерев'янюк Особливості застосування гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних системах. – 2011. – №1. – С.29 – 36.

25. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи/ Стогній Б.С. – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 6–10. – (Праці ІЕД НАНУ Спец. випуск).